खंड २, अंक १, फरवरी –२०२६
ई–विज्ञानम
मासिक विज्ञान पत्रिका

Vol. 2, Issue 1, February-2026
e-vigyanam
Monthly Science Journal

सामान्य आलेख (General Article)

DOI: 10.66346/ev.v2i1.2026.8

ZnO नैनोकणों का संश्लेषण सोल- जेल विधि से एवं चारित्रिक गुणों का समीक्षात्मक अवलोकन

हिमांशी यादव*, सत्य पाल सिंह

भौतिकी एवं पदार्थ विज्ञान विभाग, मदन मोहन मालवीय प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय, गोरखपुर, उ०प्र०, भारत-273010
लेखक से संवाद के लिए ईमेल*- himanshiyadav827@gmail.com

आलेख प्राप्त: १५ अप्रैल २०२६; स्वीकृत: २२ अप्रैल २०२६
प्रथम ऑनलाइन प्रकाशित: २५ अप्रैल २०२६

सारांश

जिंक ऑक्साइड (ZnO) नैनोकण अपने अद्वितीय ऑप्टिकल, विद्युत तथा जीवाणुरोधी गुणों के कारण व्यापक रूप से ध्यान आकर्षित कर रहे हैं। इस अध्ययन में ZnO नैनोकणों का संश्लेषण सोल–जेल विधि द्वारा किया गया, जो एक सरल, किफायती तथा प्रभावी तकनीक है और कणों के आकार एवं आकृति को नियंत्रित करने में सक्षम है। जिंक एसीटेट डाइहाइड्रेट को पूर्वगामी (precursor) तथा सोडियम हाइड्रॉक्साइड को स्थिरीकारक एवं अवक्षेपक के रूप में उपयोग किया गया। तैयार सोल को वृद्ध (aging), सुखाने के बाद क्रिस्टलीय ZnO नैनोकण प्राप्त किए गए। संश्लेषित नैनोकणों का विभिन्न विश्लेषणात्मक तकनीकों द्वारा लक्षणन किया गया। एक्स-रे विवर्तन (XRD) ने इनके क्रिस्टलीय स्वभाव और षट्कोणीय वुर्ट्ज़ाइट संरचना की पुष्टि की, तथा शेरर समीकरण द्वारा क्रिस्टलाइट आकार की गणना की गई। स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM) से सतही संरचना का अध्ययन किया गया, जबकि FTIR विश्लेषण ने क्रियात्मक समूहों तथा ZnO के निर्माण की पुष्टि की। ये नैनोकण जीवाणुरोधी गतिविधि, गैस सेंसिंग, फोटोकैटलिसिस, UV संरक्षण तथा पर्यावरणीय सुधार में उपयोगी हैं।

सूचक शब्द- नैनोकण, प्रकीर्णन, सेमीकंडक्टर, लिथोग्राफी, एक्स-रे विवर्तन, डिटेक्टर

खंड २, अंक १, फरवरी –२०२६
ई–विज्ञानम
मासिक विज्ञान पत्रिका

Vol. 2, Issue 1, February-2026
e-vigyanam
Monthly Science Journal

सामान्य आलेख (General Article)

DOI: 10.66346/ev.v2i1.2026.8

Synthesis of ZnO Nanoparticles by Sol-gel Method and Observation of Characteristic Properties

Himanshi Yadav*, Satya Pal Singh
Department of Physics and Material Science, Madan Mohan Malaviya University of Technology, Gorakhpur, Uttar Pradesh, India – 273010
Corresponding author Email*: himanshiyadav827@gmail.com

Received on: 15 April 2026; Accepted: 22 April 2026
Published Online First on: 25 April 2026

ABSTRACT

Zinc oxide (ZnO) nanoparticles have gained considerable attention owing to their unique optical, electrical, and antimicrobial properties. In this study, ZnO nanoparticles were synthesized using the sol–gel method, a simple, cost-effective, and efficient technique that enables controlled particle size and morphology. Zinc acetate dihydrate was used as the precursor, and sodium hydroxide served as the stabilizing and precipitating agent. The prepared sol was aged, and dried to obtain crystalline ZnO nanoparticles. The synthesized nanoparticles were characterized using various analytical techniques. X-ray diffraction (XRD) confirmed their crystalline nature and hexagonal wurtzite structure, and the crystallite size was calculated using the Scherrer equation. Scanning Electron Microscopy (SEM) was used to reveal the surface morphology. FTIR analysis confirmed the functional groups and ZnO formation. These nanoparticles have promising applications in antibacterial activity, gas sensing, photocatalysis, UV protection, and environmental remediation.

Keywords – Nanoparticles, Scattering, Semiconductor, Lithography, X-ray Diffraction, Detector

नैनोकण क्या हैं?

नैनोकण नैनोमीटर श्रेणी के सूक्ष्म कण होते हैं, जिनका आकार लगभग 1–100 नैनोमीटर के बीच होता है। अत्यंत छोटे आकार के कारण ये नग्न आँखों से दिखाई नहीं देते तथा पारंपरिक सूक्ष्मदर्शी से इनका अवलोकन कठिन होता है। इनका सतह-से-आयतन अनुपात अधिक होने के कारण इनके भौतिक एवं रासायनिक गुण अपने स्थूल पदार्थों से भिन्न होते हैं। नैनोकणों का निर्माण धातु, अर्धचालक, सिरेमिक एवं पॉलिमर जैसी विभिन्न सामग्रियों से किया जाता है तथा इनके आकार, आकृति एवं सतही गुणों को नियंत्रित कर इन्हें विशिष्ट अनुप्रयोगों के लिए अनुकूलित किया जा सकता है।

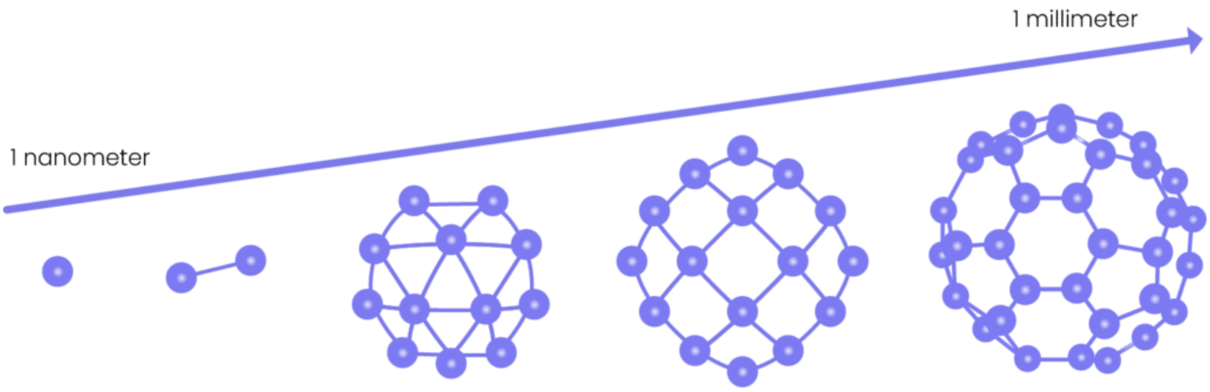
नैनोकण आधुनिक विज्ञान और प्रौद्योगिकी में अत्यंत महत्वपूर्ण हो गए हैं। चिकित्सा क्षेत्र में इनका उपयोग लक्षित औषधि वितरण, कैंसर उपचार तथा इमेजिंग तकनीकों में किया जाता है। पर्यावरण संरक्षण में ये जल एवं वायु शुद्धिकरण तथा प्रदूषकों के विघटन में सहायक हैं, जबकि ऊर्जा क्षेत्र में सोलर सेल और बैटरियों की दक्षता बढ़ाने में उपयोगी हैं। इलेक्ट्रॉनिक्स और कृषि में भी इनका व्यापक उपयोग देखा जाता है।

इसी संदर्भ में जिंक ऑक्साइड (ZnO) नैनोकण एक महत्वपूर्ण धातु ऑक्साइड नैनोमैटीरियल हैं, जिनमें उच्च सतह क्षेत्र, उत्कृष्ट ऑप्टिकल गुण एवं उन्नत रासायनिक सक्रियता पाई जाती है। इन्हें sol-gel विधि द्वारा सरल एवं किफायती तरीके से तैयार किया जाता है। ZnO एक अर्धचालक पदार्थ है जिसका बैंड गैप लगभग 3.37 eV होता है, जिससे यह UV क्षेत्र में सक्रिय रहता है। इसके अतिरिक्त, इसमें एंटीबैक्टीरियल गुण होते हैं, जो Reactive Oxygen Species के माध्यम से सूक्ष्मजीवों को नष्ट करते हैं, इसलिए इसका उपयोग चिकित्सा, पर्यावरण, सेंसर एवं कॉस्मेटिक उत्पादों में व्यापक रूप से किया जाता है।[1,2]

चित्र 1: नैनोकण के विभिन्न क्षेत्रों में अनुप्रयोग का योजनात्मक निरूपण।

नैनोकण का आकार

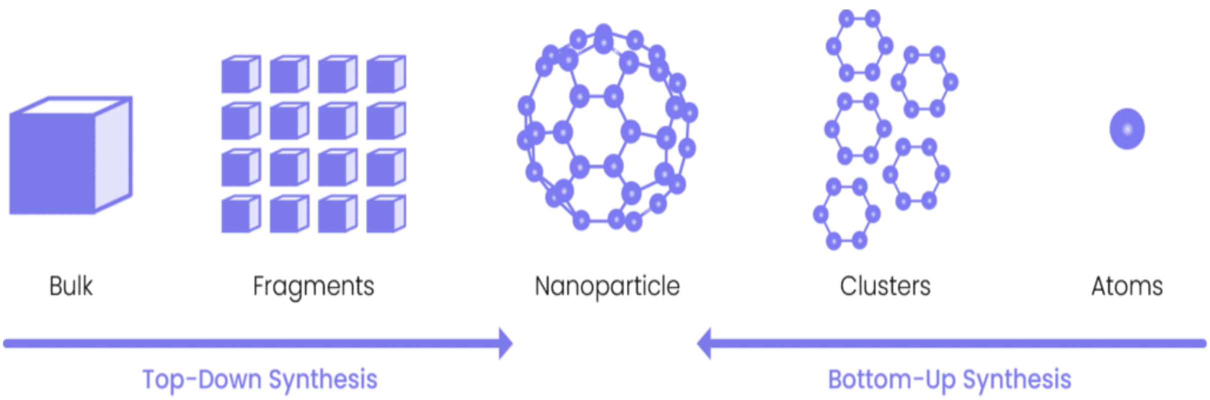
नैनोकणों का आकार आमतौर पर 1 से 100 नैनोमीटर तक होता है, जो मानव बाल की चौड़ाई से लगभग 1000 गुना छोटा होता है। आकार एक महत्वपूर्ण कारक है जो नैनोकणों के गुणों और व्यवहार को प्रभावित करता है। जब कणों का आकार नैनोस्केल तक कम हो जाता है, तो उनके भौतिक, रासायनिक और प्रकाशीय गुण महत्वपूर्ण रूप से बदल सकते हैं। सामान्यतः, नैनोकणों का आकार घटने के साथ-साथ उनका पृष्ठीय क्षेत्रफल और आयतन का अनुपात बढ़ता है, जिससे सतही परमाणुओं की संख्या और प्रतिक्रियाशीलता बढ़ जाती है। छोटे नैनोकणों की यह उच्च प्रतिक्रियाशीलता उनकी उच्च पृष्ठीय ऊर्जा के कारण होती है, जो उन्हें उत्प्रेरण और अन्य रासायनिक अनुप्रयोगों के लिए आदर्श बनाती है। नैनोकणों के प्रकाशीय गुण, जैसे अवशोषण, प्रतिदीप्ति और प्रकीर्णन, भी इसी प्रकार आकार पर निर्भर करते हैं। इसके अतिरिक्त, नैनोकणों का आकार उनके जैविक गुणों को भी प्रभावित कर सकता है, जैसे कि जैविक अवरोधों को पार करने या कोशिकाओं के साथ परस्पर क्रिया करने की उनकी क्षमता। छोटे नैनोकण ऊतकों में अधिक गहराई तक प्रवेश कर सकते हैं, जो दवा वितरण अनुप्रयोगों के लिए वांछनीय हो सकता है। हालांकि, नैनोकणों से जुड़े संभावित जोखिमों पर सावधानीपूर्वक विचार करना महत्वपूर्ण है, क्योंकि उनका छोटा आकार उनकी विषाक्तता और पर्यावरणीय प्रभावों को भी बढ़ा सकता है।



चित्र 2: नैनोकणों का आकार (1–100 nm) और संरचनात्मक परिवर्तन
स्रोत-Nanoparticle - Wikipedia

नैनोकणों का निर्माण कैसे होता है?

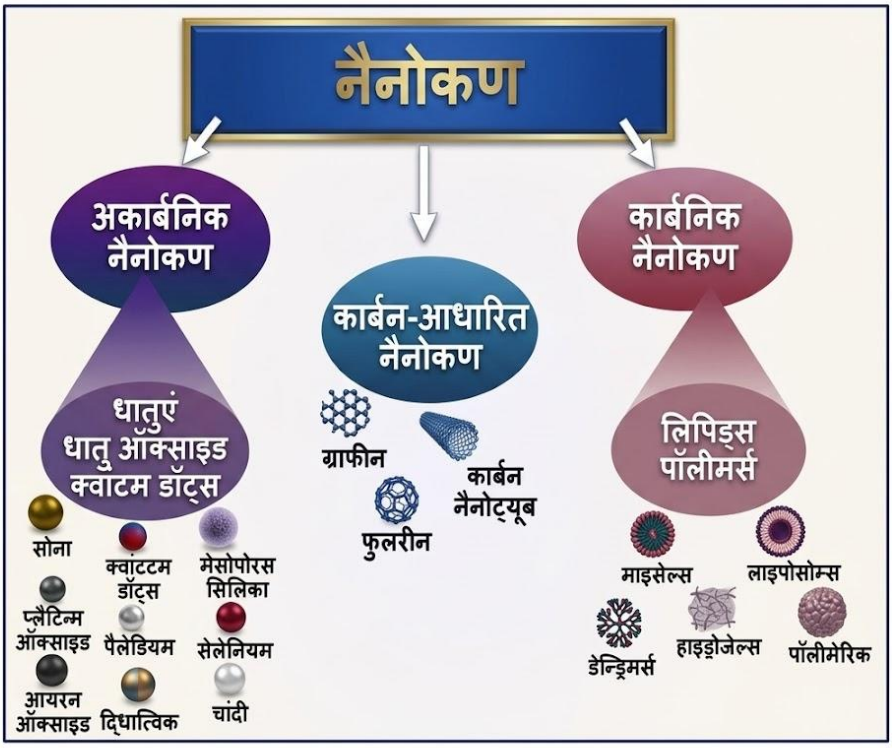
नैनोकणों का निर्माण धातुओं, धातु ऑक्साइड, सिरेमिक, अर्धचालकों, पॉलिमर और जैविक लिपिड सहित विभिन्न सामग्रियों से किया जा सकता है। इनका निर्माण दो विधियों में से किसी एक का उपयोग करके किया जाता है: शीर्ष-नीचे संश्लेषण या नीचे-ऊपर संश्लेषण। शीर्ष-नीचे संश्लेषण विधि में, थोक सामग्रियों को पिसाई, लिथोग्राफी और नक़्क़ाशी के माध्यम से छोटे कणों में तोड़ा जाता है। इसके विपरीत, नीचे-ऊपर संश्लेषण विधि में परमाणुओं या अणुओं जैसे छोटे निर्माण खंडों से नैनोकणों का निर्माण किया जाता है, जिसमें (1) रासायनिक संश्लेषण, (2) स्व-संयोजन या (3) जैवखनिजीकरण जैसी तकनीकों का उपयोग किया जाता है।



चित्र 3: नैनोकणों का निर्माण: शीर्ष-से-नीचे (Top-Down) और नीचे-से-ऊपर (Bottom-Up) संश्लेषण विधियों द्वारा बल्क पदार्थ से परमाणुओं तक की प्रक्रिया का चित्रण।
स्रोत-Nanoparticle - Wikipedia

नैनोकण का वर्गीकरण (Classification of Nanoparticles)

नैनोकण का वर्गीकरण उनके संरचना, रासायनिक संरूप, उत्पत्ति तथा गुणों के आधार पर किया जाता है। सामान्यतः नैनोकण को चार प्रमुख वर्गों में विभाजित किया जाता है। पहला, धात्विक नैनोकण, जिनमें सोना (Au), चाँदी (Ag) आदि शामिल होते हैं, ये मुख्यतः अपनी उच्च चालकता और एंटीबैक्टीरियल गुणों के लिए जाने जाते हैं। दूसरा, धातु ऑक्साइड नैनोकण, जैसे जिंक ऑक्साइड (ZnO) और टाइटेनियम डाइऑक्साइड (TiO_2), जो सेमीकंडक्टर गुणों और पर्यावरणीय अनुप्रयोगों के लिए महत्वपूर्ण होते हैं। तीसरा, कार्बन आधारित नैनोकण, जैसे कार्बन नैनोट्यूब और ग्रेफीन, जो अपनी मजबूती और विद्युत गुणों के लिए प्रसिद्ध हैं। चौथा, पॉलिमर आधारित नैनोकण, जो जैव-चिकित्सा क्षेत्र में दवा वितरण के लिए उपयोग किए जाते हैं। इस प्रकार, नैनोकण का वर्गीकरण उनके गुणों और उपयोग के अनुसार किया जाता है, जो विभिन्न वैज्ञानिक और औद्योगिक क्षेत्रों में उनके चयन को आसान बनाता है।



चित्र 4: नैनोकण का वर्गीकरण

नैनोमैटेरियल के संश्लेषण के लिए अपनाए जाने वाले तरीके

नैनोमैटेरियल के संश्लेषण के लिए मुख्यतः दो प्रमुख तरीके उपयोग किए जाते हैं—
टॉप-डाउन (Top-Down) अप्रोच और बॉटम-अप (Bottom-Up) अप्रोच।

टॉप-डाउन अप्रोच (Top-Down Approaches)

टॉप-डाउन अप्रोच में बड़े (बल्क) पदार्थों को छोटे-छोटे भागों में विभाजित करके नैनोसंरचित पदार्थ बनाए जाते हैं। इस विधि में मुख्य तकनीकों में मैकेनिकल मिलिंग, लेजर एब्लेशन, एचिंग, स्पटरिंग तथा इलेक्ट्रो-एक्सप्लोजन शामिल हैं।

मैकेनिकल मिलिंग

एक किफायती और प्रभावी तकनीक है, जिसके द्वारा बल्क पदार्थों से नैनोस्तर के कण तैयार किए जाते हैं। यह विभिन्न फेज़ के मिश्रण बनाने तथा नैनोकॉम्पोजिट तैयार करने में सहायक होती है। बॉल मिलिंग के सिद्धांत पर आधारित यह विधि ऑक्साइड और कार्बाइड से सुदृढ़ एल्युमिनियम मिश्रधातु, घिसाव-रोधी कोटिंग्स तथा एल्युमिनियम, निकेल, मैग्नीशियम और कॉपर आधारित नैनोमिश्रधातु बनाने में उपयोगी है। बॉल-मिल्ड कार्बन नैनोमैटेरियल्स ऊर्जा भंडारण, ऊर्जा रूपांतरण और पर्यावरण शोधन में भी महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं।

इलेक्ट्रोस्पिनिंग

एक सरल टॉप-डाउन तकनीक है, जिसका उपयोग मुख्यतः नैनोफाइबर बनाने के लिए किया जाता है। इसमें प्रायः पॉलिमर का उपयोग होता है। कोएक्सियल इलेक्ट्रोस्पिनिंग इस तकनीक का उन्नत रूप है, जिसमें दो सह-अक्षीय केपिलरी का उपयोग करके कोर-शेल संरचना वाले नैनोफाइबर तैयार किए जाते हैं। यह विधि बड़े पैमाने पर अति-पतले नैनोफाइबर तथा विभिन्न पॉलिमर, अकार्बनिक और हाइब्रिड पदार्थों के निर्माण में अत्यंत प्रभावी है।

लिथोग्राफी

लिथोग्राफी नैनोसंरचनाओं के निर्माण के लिए एक महत्वपूर्ण तकनीक है, जिसमें प्रकाश या इलेक्ट्रॉन की केंद्रित किरण का उपयोग किया जाता है। इसे मुख्यतः दो प्रकारों में विभाजित किया जाता है—मास्क्ड लिथोग्राफी और मास्कलेस लिथोग्राफी। मास्क्ड लिथोग्राफी में विशेष मास्क या टेम्पलेट की सहायता से बड़े क्षेत्र पर नैनोपैटर्न बनाए जाते हैं, जैसे फोटोलिथोग्राफी, नैनोइम्प्रिंट और सॉफ्ट लिथोग्राफी। जबकि मास्कलेस लिथोग्राफी में बिना मास्क के सीधे नैनोपैटर्न बनाए जाते हैं, जैसे स्कैनिंग प्रोब, फोकस्ड आयन बीम और इलेक्ट्रॉन बीम लिथोग्राफी।

कणिक्षेपण

कणिक्षेपण एक प्रक्रिया है जिसमें उच्च-ऊर्जा कणों (जैसे प्लाज़्मा या गैस आयन) से ठोस सतह पर बमबारी कर नैनोमैटेरियल तैयार किए जाते हैं। यह तकनीक पतली परत (थिन फिल्म) बनाने में प्रभावी है। इसमें आयन टकराव से लक्ष्य सतह से परमाणु बाहर निकलते हैं। यह प्रक्रिया वैक्यूम चैम्बर में होती है और इसमें मैग्नेट्रॉन, रेडियो-फ्रीक्वेंसी तथा DC डायोड स्पटरिंग शामिल हैं। यह कम अशुद्धियों और कम लागत के कारण उपयोगी मानी जाती है।

आर्क डिस्चार्ज विधि

आर्क डिस्चार्ज विधि विभिन्न नैनोस्ट्रक्चर, विशेषकर कार्बन आधारित पदार्थ जैसे फुलरीन, कार्बन नैनोट्यूब, नैनोहॉर्न और ग्रेफीन बनाने के लिए महत्वपूर्ण है। इसमें दो ग्रेफाइट रॉड को हीलियम गैस भरे चैम्बर में रखा जाता है, जहाँ आर्क डिस्चार्ज से कार्बन वाष्पीकृत होकर नैनोकण बनते हैं। ऑक्सीजन या नमी की उपस्थिति फुलरीन के निर्माण को रोकती है। अलग-अलग परिस्थितियों में विभिन्न संरचनाएँ बनती हैं, जैसे अलग गैस वातावरण में अलग आकार के नैनोहॉर्न प्राप्त होते हैं।

लेजर पृथक्करणलेजर

लेजर पृथक्करण में उच्च ऊर्जा लेजर बीम लक्ष्य पदार्थ पर डालकर उसे वाष्पीकृत किया जाता है, जिससे नैनोकण बनते हैं। यह एक ग्रीन तकनीक मानी जाती है क्योंकि इसमें रसायनों की आवश्यकता नहीं होती। इससे धातु, ऑक्साइड, कार्बन और सिरेमिक नैनोमैटेरियल बनाए जा सकते हैं, तथा कणों का आकार लेजर की ऊर्जा और तरंगदैर्ध्य से नियंत्रित किया जा सकता है।

बॉटम-अप अप्रोच (Bottom-Up Approaches)

केमिकल वेपर डिपोजिशन (CVD)

इस विधि में वाष्प अवस्था के प्रीकर्सर की रासायनिक अभिक्रिया द्वारा सब्सट्रेट पर पतली परत बनाई जाती है। उच्च तापमान पर गैस के विघटन से कार्बन परमाणु निकलते हैं, जो जुड़कर नैनोसंरचना बनाते हैं। उत्प्रेरक की प्रकृति से उत्पाद की संरचना और गुणवत्ता नियंत्रित होती है, जिससे उच्च गुणवत्ता नैनोमैटेरियल प्राप्त होते हैं।

हाइड्रोथर्मल एवं सॉल्वोथर्मल विधि

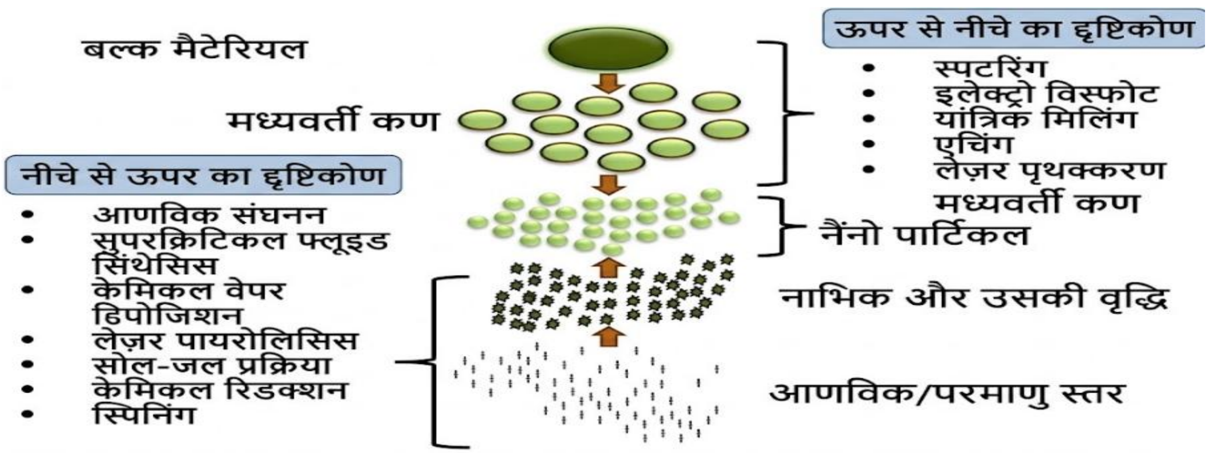
इन विधियों में बंद पात्र में जलीय या अजलीय माध्यम में उच्च ताप और दाब पर अभिक्रिया कर नैनोमैटेरियल बनाए जाते हैं। यह तकनीक विभिन्न आकार जैसे नैनोवायर, नैनोरॉड, नैनोशीट और नैनोस्फीयर बनाने में उपयोगी है। माइक्रोवेव सहायता से यह प्रक्रिया और तेज तथा अधिक प्रभावी हो जाती है।

टेम्पलेट विधि (सॉफ्ट एवं हार्ड)

इस विधि में सॉफ्ट टेम्पलेट जैसे सर्फैक्टेंट या पॉलिमर तथा हार्ड टेम्पलेट जैसे सिलिका या कार्बन का उपयोग किया जाता है। टेम्पलेट की संरचना के अनुसार नैनोपोरस सामग्री तैयार होती है। अंत में टेम्पलेट हटाकर इच्छित नैनोसंरचना प्राप्त की जाती है, जिससे विभिन्न जटिल संरचनाएँ आसानी से बनती हैं।

रिवर्स माइसेल विधि

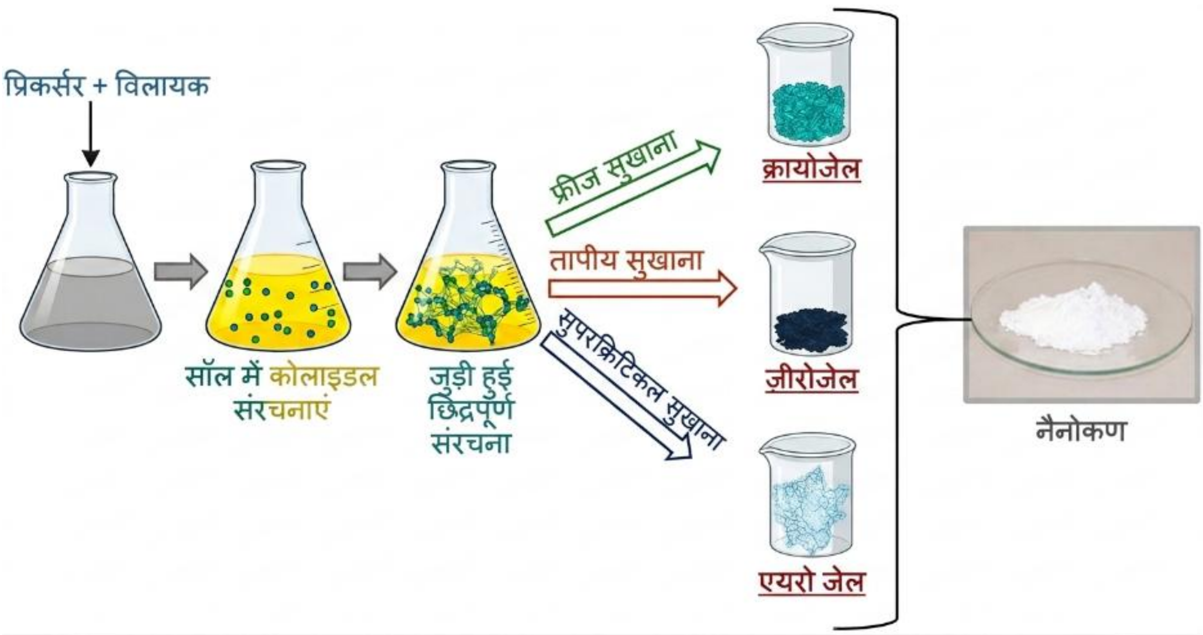
इस तकनीक में पानी-इन-ऑयल माइसेल बनाए जाते हैं, जिनका कोर नैनोरिएक्टर की तरह कार्य करता है। इसमें अभिक्रिया नियंत्रित स्थान पर होती है, जिससे कणों का आकार और वितरण नियंत्रित रहता है। पानी और सर्फैक्टेंट के अनुपात को बदलकर नैनोकणों के आकार को आसानी से नियंत्रित किया जा सकता है।



चित्र 5: यह चित्र टॉप-डाउन और बॉटम-अप दृष्टिकोणों के माध्यम से नैनोमटेरियल्स के संश्लेषण को दर्शाता है।

सोल-जेल विधि

आजकल नैनोकणों के संश्लेषण के लिए कई तकनीकों का उपयोग किया जाता है। हालांकि उपर्युक्त सभी तकनीकें बड़ी मात्रा में नैनोमटेरियल्स उत्पन्न कर सकती हैं, लेकिन सोल-जेल तकनीक उद्योगों में अधिक व्यापक रूप से उपयोग की जाती है और अधिक लोकप्रिय है। अपनी विशेष विशेषताओं के कारण, यह तकनीक औद्योगिक पैमाने पर समान आकार और आकृति के उच्च-गुणवत्ता वाले नैनोकणों का उत्पादन कर सकती है। यह प्रक्रिया दो या दो से अधिक धातु (या धातु ऑक्साइड) अग्रदूतों को निश्चित अनुपात में मिलाकर एक साथ दो या दो से अधिक विभिन्न प्रकार के नैनोकणों और उनसे बने मिश्र धातुओं का निर्माण कर सकती है। इसके अतिरिक्त, सोल-जेल प्रक्रिया द्वारा 99.99% शुद्धता वाले अत्यंत समरूप मिश्रित पदार्थ भी बनाए जा सकते हैं। इस विधि में कम या सामान्य प्रसंस्करण तापमान की आवश्यकता होती है, जिससे 70°C से 320°C के तापमान सीमा में धातु और सिरेमिक नैनोमटेरियल्स का उत्पादन करना अधिक सुविधाजनक हो जाता है। यही कारण है कि यह अन्य पारंपरिक विधियों से बेहतर है। यह एक बॉटम-अप संश्लेषण तकनीक है। अंतिम उत्पाद बनाने के लिए इस प्रक्रिया में कई अपरिवर्तनीय रासायनिक अभिक्रियाएं की जाती हैं। इस प्रक्रिया में शामिल प्रमुख चरण चित्र 6 में दर्शाए गए हैं।



चित्र 6: सोल-जेल प्रक्रिया के पाँच प्रमुख चरणों को दर्शाया गया है।

प्रारंभिक समरूप अणु (सोल) इन प्रतिक्रियाओं से गुजरते हैं और अणुओं के एक भारी, त्रि-आयामी नेटवर्क में परिवर्तित हो जाते हैं, जिसे "जेल" कहा जाता है। धातु ऑक्साइड नैनोकण (MONPs) का व्यापक रूप से ऑप्टिकल उपकरणों, फोटोवोल्टिक प्रणालियों, चिकित्सा प्रणालियों, शुद्धिकरण प्रणालियों, ऊर्जा रूपांतरण, एंटेना और अन्य अनुप्रयोगों में उपयोग किया जाता है। अन्य भौतिक और रासायनिक विधियों की तुलना में उच्च गुणवत्ता वाले धातु ऑक्साइड नैनोकणों के निर्माण के लिए सोल-जेल एक बहुत ही प्रभावी तरीका है। यह तकनीक नैनोकणों की सतह विशेषताओं और उसके परिष्करण पर उत्कृष्ट नियंत्रण प्रदान करती है। ZnO NDS के संश्लेषण के लिए उपयोग की जाने वाली सोल-जेल विधि को चित्र [6] में दर्शाए गए पाँच प्रमुख चरणों का उपयोग करके समझाया जा सकता है।

चरण 1: जल अपघटन: जल अपघटन प्रक्रिया में एल्कोक्साइड का उपयोग अग्रदूत के रूप में किया जाता है। इस अग्रदूत को पानी या अल्कोहल में मिलाकर धातु ऑक्साइड नैनोकण बनाए जाते हैं। धातु ऑक्साइड के निर्माण के लिए ऑक्साइड आवश्यक है और यह पानी या किसी कार्बनिक विलायक (जैसे अल्कोहल) द्वारा प्रदान किया जाता है। जब जल का उपयोग सोल-जेल विधि में अभिक्रिया माध्यम के रूप में किया जाता है, तो इसे "जलीय सोल-जेल विधि" कहा जाता है। जब कार्बनिक विलायक का उपयोग सोल-जेल विधि में अभिक्रिया माध्यम के रूप में किया जाता है, तो इस प्रक्रिया को "गैर-जलीय सोल-जेल विधि" कहा जाता है। जल अपघटन अग्रदूत, जैसे अम्ल या क्षार, पानी और अल्कोहल के साथ मिलकर इस प्रक्रिया में सहायता करते हैं। जल अपघटन प्रक्रिया में रासायनिक अभिक्रियाओं को इस प्रकार लिखा जा सकता है:

M-OR+H,OM-OH + OR (हाइड्रोलिसिस) (1)

यहाँ M धातु R एल्काइल समूह (CHN)

पानी की मात्रा जेल की गतिशीलता पर महत्वपूर्ण प्रभाव डालती है। इसकी उपस्थिति से संघनन के दौरान शाखाओं वाली संरचनाओं का निर्माण होता है, जिसके परिणामस्वरूप गतिशीलता बढ़ जाती है।

चरण 2: संघनन: संघनन प्रक्रिया में, बनने वाले अणु व्यवस्थित होकर सघन अवस्थाएँ बनाते हैं। द्रव अवस्था में, जेल का बहुलक जाल कोलाइडल आयामों तक फैलता है, जहाँ धातु ऑक्साइड बंध बनते हैं और अल्कोहल या जल के अणु बाहर निकल जाते हैं। संघनन प्रक्रिया के दौरान ओलेशन और ऑक्सोलेशन प्रक्रियाएँ होती हैं। "ओलेशन" वह प्रक्रिया है जिसके द्वारा दो धातु परमाणुओं (धातु-हाइड्रॉक्सिल-धातु) अणुओं के बीच एक हाइड्रॉक्सिल (-OH) सेतु बनता है। "ऑक्सोलेशन" वह प्रक्रिया है जिसके द्वारा दो धातु परमाणुओं (अर्थात, धातु-ऑक्सो-धातु बंध) के बीच एक ऑक्सो (--) सेतु बनता है। संघनन प्रक्रिया में होने वाली रासायनिक अभिक्रियाओं को इस प्रकार व्यक्त किया जा सकता है:

M-OH+XO-MM-O-M + XOH (संघनन) (2)

यहाँ M धातु है, X = H या एल्काइल समूह (CH)

विलयन में कोलाइडल कणों के आपस में जुड़ने से एक छिद्रयुक्त द्रव संरचना बनती है जिसे जेल कहते हैं। विलायक की श्यानता बढ़ने पर अंततः संघनन या बहुसंघनन होता है। यह प्रक्रिया विलायक की श्यानता और pH पर निर्भर करती है।

चरण 3: उम्र बढ़ना: उम्र बढ़ने की प्रक्रिया जेल की संरचना और गुणों में निरंतर परिवर्तन के लिए जिम्मेदार है। सीमित विलयन के भीतर संघनन होता है और जेल का पुनः अवक्षेपण होता है, जिसके परिणामस्वरूप संरंध्रता में कमी और कोलाइडल कणों के घनत्व में वृद्धि होती है।

चरण 4: सुखाने की प्रक्रिया: सुखाने की प्रक्रिया बहुत जटिल होती है क्योंकि पानी और कार्बनिक यौगिक दोनों अलग-अलग जेल बनाते हैं जो इसकी संरचना में बाधा डालते हैं। सुखाने की प्रक्रिया कई प्रकार की होती है।

(ए) वायुमंडलीय/तापीय सुखाने

(ख) अतिक्रांतिक सुखाने

(सी) फ्रीज-ड्राइंग

उपरोक्त तीनों का जेल नेटवर्क की संरचना पर अलग-अलग प्रभाव पड़ता है। उच्च तापमान पर, छिद्रयुक्त जेल को गर्म करते समय संपीड़न लागू किया जाता है, जिससे छिद्र समाप्त हो जाते हैं और ज़ेरोजेल प्राप्त होता है।

चरण 5: कैल्सीनेशन प्रक्रिया: नमूने से अवशिष्ट जल अणुओं को हटाने के लिए अंतिम चरण में ऊष्मीय कैल्सीनेशन प्रक्रिया का उपयोग किया जाता है। कैल्सीनेशन प्रक्रिया सामग्री के छिद्र आकार और घनत्व को नियंत्रित करने में एक महत्वपूर्ण पैरामीटर है। कैल्सीनेशन 200°C से 500°C के उच्च तापमान पर किया जाता है।[7]

कैरेक्टराइजेशन तकनीक

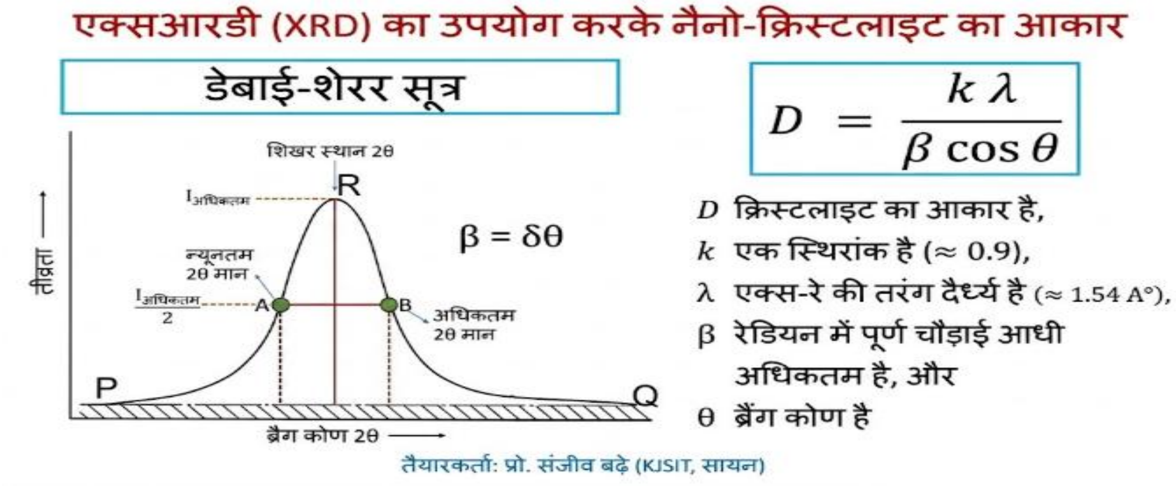
एक्स-रे विवर्तन (XRD – X-Ray Diffraction)

एक्स-रे विवर्तन (XRD-X-Ray Diffraction) एक महत्वपूर्ण तकनीक है जिसका उपयोग क्रिस्टलाइन पदार्थों, विशेषकर नैनोकण की संरचना का अध्ययन करने के लिए किया जाता है। इसमें जब एक्स-रे किरणें किसी क्रिस्टल पर डाली जाती हैं, तो वे क्रिस्टल के अंदर मौजूद समांतर परमाणु तल (crystal planes) से टकराकर विभिन्न दिशाओं में विवर्तित हो जाती हैं। यह प्रक्रिया **Bragg's Law** के अनुसार होती है, जिसके अनुसार $n\lambda = 2d\sin\,\theta$होता है। जब यह शर्त पूरी होती है, तब कंस्ट्रक्टिव इंटरफेरेंस के कारण XRD पैटर्न में तीव्र पीक्स (peaks) दिखाई देते हैं। XRD यंत्र में एक्स-रे स्रोत से निकलने वाली किरणें सैंपल पर डाली जाती हैं और विवर्तित किरणों को डिटेक्टर द्वारा रिकॉर्ड किया जाता है, जिससे intensity बनाम 2θका ग्राफ प्राप्त होता है। इस ग्राफ के विश्लेषण से पदार्थ की क्रिस्टल संरचना, फेज, तथा कणों के आकार के बारे में महत्वपूर्ण जानकारी प्राप्त की जाती है। नैनोकणों (Nanoparticles) के आकार को मापने के लिए **Scherrer Formula** सबसे लोकप्रिय तरीका है। जब हम X-Ray Diffraction (XRD) पैटर्न प्राप्त करते हैं, तो उसमें दिखने वाली "peaks" की चौड़ाई हमें कण के आकार (Crystallite size) के बारे में बताती है। इसका गणितीय रूप (Mathematical form) इस प्रकार है:

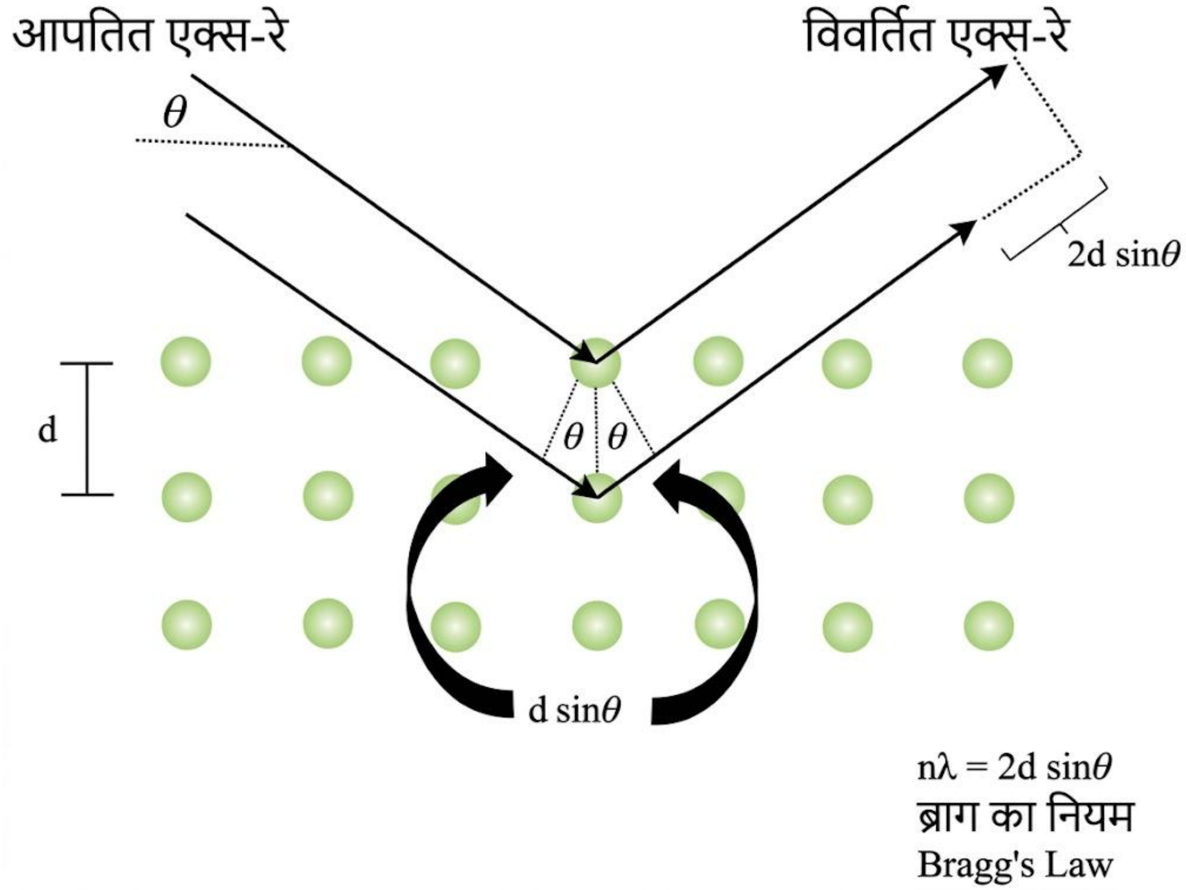
$$D = \frac{K\lambda}{\beta\, cos\,\theta} \quad (3)$$

यहाँ प्रत्येक प्रतीक (Symbol) का अर्थ नीचे दिया गया है:

- **D**: क्रिस्टलाइट आकार (Crystallite size) - यह नैनोकण के औसत आकार को दर्शाता है।
- **K**: आकार कारक (Shape factor) - यह आमतौर पर लगभग **0.9** लिया जाता है (कणों के आकार के आधार पर यह 0.6 से 2.0 तक हो सकता है)।
- **lambda**: एक्स-रे की तरंग दैर्ध्य (X-ray wavelength) - आमतौर पर Cu-K\alpha विकिरण के लिए यह **1.5406 Å** होती है।
- **beta**: फुल विड्थ एट हाफ मैक्सिमम (**FWHM**) - यह XRD पीक की वह चौड़ाई है जो उसकी अधिकतम ऊंचाई के आधे हिस्से पर मापी जाती है। इसे हमेशा **रेडियन (Radians)** में लिया जाता है।
- **theta**: ब्रैग एंगल (Bragg angle) - यह पीक की स्थिति (Position) का आधा मान होता है |



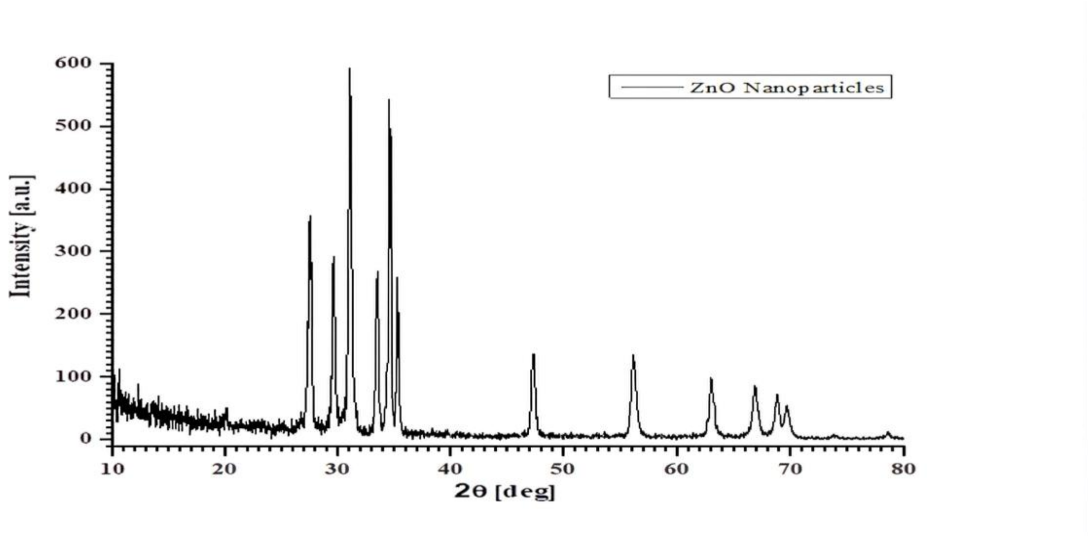
चित्र 7: एक्स-रे विवर्तन का सेटअप



चित्र 8: एक्स-रे विवर्तन का सेटअप

एक्स-रे विवर्तन का आरेख

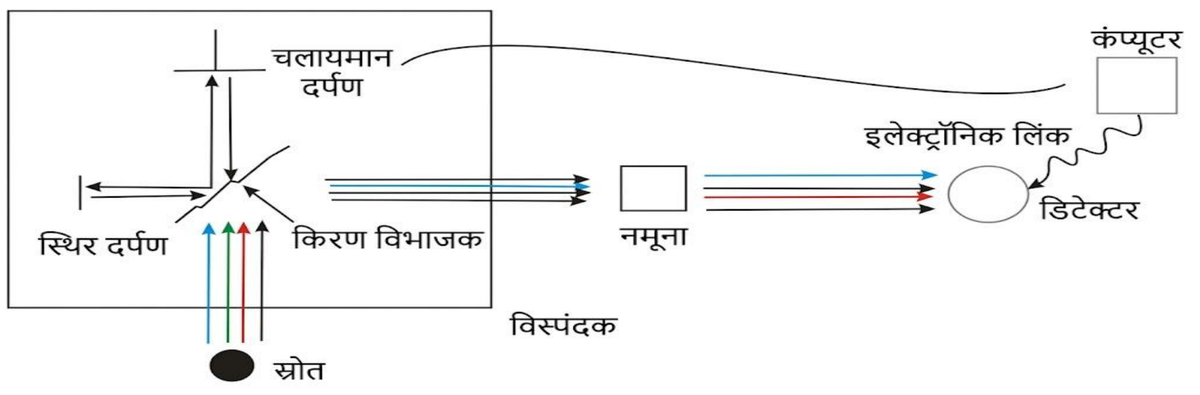
इस पत्रिका में, हमने ZnO नैनोकण को सोल–जेल विधि द्वारा तैयार किया है। हालांकि यह चित्र XRD विश्लेषण को दर्शाता है, जबकि हमारे द्वारा तैयार किए गए ZnO नैनोकण की सतही संरचना को समझने के लिए SEM इमेज का भी उपयोग किया गया है।



चित्र 9: यह चित्र जिंक ऑक्साइड (ZnO) नैनोकण का XRD (एक्स-रे विवर्तन) पैटर्न दर्शाता है, जिसमें विभिन्न विवर्तन पीक्स जैसे (110), (112), (103) और (201) दिखाई दे रहे हैं। ये पीक्स ZnO की क्रिस्टलीय संरचना की पुष्टि करते हैं और बताते हैं कि संश्लेषित नैनोकण अच्छी तरह से क्रिस्टलाइन हैं।

फूरियर ट्रांसफॉर्म इन्फ्रारेड स्पेक्ट्रोस्कोपी (FTIR)

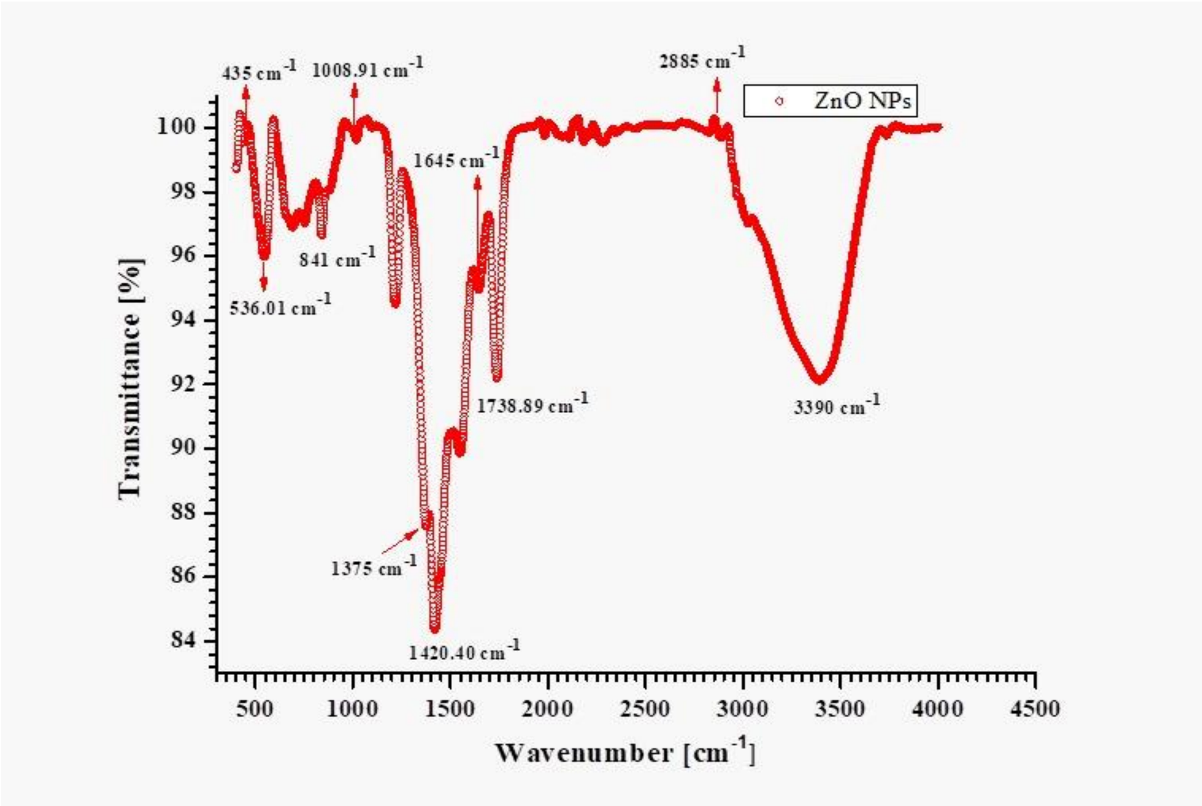
फूरियर ट्रांसफॉर्म इन्फ्रारेड स्पेक्ट्रोस्कोपी (FTIR) एक महत्वपूर्ण विश्लेषणात्मक तकनीक है, जिसका उपयोग किसी पदार्थ में उपस्थित रासायनिक बंधों तथा फंक्शनल ग्रुप्स की पहचान करने के लिए किया जाता है। इस तकनीक में इन्फ्रारेड किरणें सैंपल पर डाली जाती हैं, जिनमें से कुछ विशेष तरंगदैर्ध्य सैंपल के अणुओं द्वारा अवशोषित कर लिए जाते हैं। प्राप्त सिग्नल को इंटरफेरोमीटर द्वारा संसाधित किया जाता है और कंप्यूटर की सहायता से फूरियर ट्रांसफॉर्म के माध्यम से स्पेक्ट्रम (ग्राफ) प्राप्त किया जाता है, जिसमें ट्रांसमिटेंस या एब्जॉर्बेंस बनाम वेवनंबर (cm^{-1}) दर्शाया जाता है। इस स्पेक्ट्रम में प्राप्त पीक्स के आधार पर विभिन्न फंक्शनल ग्रुप्स जैसे –OH, –NH, –CO आदि की पहचान की जाती है। FTIR का उपयोग विशेष रूप से नैनोकण की सतह पर उपस्थित अणुओं, सैंपल की शुद्धता तथा उसकी रासायनिक संरचना के अध्ययन के लिए किया जाता है, इसलिए यह रसायन और नैनोविज्ञान के क्षेत्र में अत्यंत उपयोगी तकनीक है।



चित्र 10: फूरियर ट्रांसफॉर्म इन्फ्रारेड स्पेक्ट्र

स्रोत- doi:10.3390/ijms20112671

यह चित्र (11) जिंक ऑक्साइड नैनोकणों (ZnO NPs) के FTIR (फूरियर ट्रांसफॉर्म इन्फ्रारेड स्पेक्ट्रोस्कोपी) विश्लेषण को दर्शाता है। यह ग्राफ़ मुख्य रूप से निम्नलिखित बातों की व्याख्या करता है:रासायनिक बंधों की पहचान: यह स्पेक्ट्रम नमूने में मौजूद विभिन्न कार्यात्मक समूहों (functional groups) और रासायनिक बंधों की पहचान करता है। ग्राफ़ में नीचे की ओर जाने वाले 'शिखर' (peaks) उन विशिष्ट तरंग संख्याओं (wavenumbers) को दर्शाते हैं जहाँ पदार्थ ने इन्फ्रारेड प्रकाश को अवशोषित किया है।प्रमुख शिखर और उनके अर्थ:3390 cm^{-1}: यह चौड़ा शिखर आमतौर पर O-H स्ट्रेचिंग को दर्शाता है, जो नैनोकणों की सतह पर सोखे गए पानी या नमी की उपस्थिति का संकेत देता है।2885 cm^{-1}: यह C-H बंधों की उपस्थिति को दर्शा सकता है।1420 $cm^{-1} और 1645 cm^{-1}: ये शिखर आमतौर पर C=O या अन्य कार्बनिक अवशेषों के कंपन से संबंधित होते हैं जो संश्लेषण (synthesis) के दौरान उपयोग किए गए रसायनों से रह जाते हैं।435 cm^{-1} और 536 cm^{-1}: ये सबसे महत्वपूर्ण शिखर हैं। कम तरंग संख्या वाले क्षेत्र में ये शिखर Zn-O बंध के खिंचाव (stretching vibration) की पुष्टि करते हैं, जिससे यह सिद्ध होता है कि जिंक ऑक्साइड का निर्माण हो गया है।[5,6]



चित्र 11: यह चित्र जिंक ऑक्साइड नैनोकणों (ZnO NPs) के FTIR (फूरियर ट्रांसफॉर्म इन्फ्रारेड स्पेक्ट्रोस्कोपी) विश्लेषण को दर्शाता है।

स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM)

स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM – Scanning Electron Microscopy) एक उन्नत तकनीक है जिसका उपयोग किसी पदार्थ की सतह (surface morphology) और सूक्ष्म संरचना को बहुत अधिक आवर्धन (magnification) पर देखने के लिए किया जाता है। इसमें प्रकाश (light) की जगह इलेक्ट्रॉन बीम (electron beam) का उपयोग किया जाता है, जिससे नैनोमीटर स्तर तक की जानकारी प्राप्त की जा सकती है।

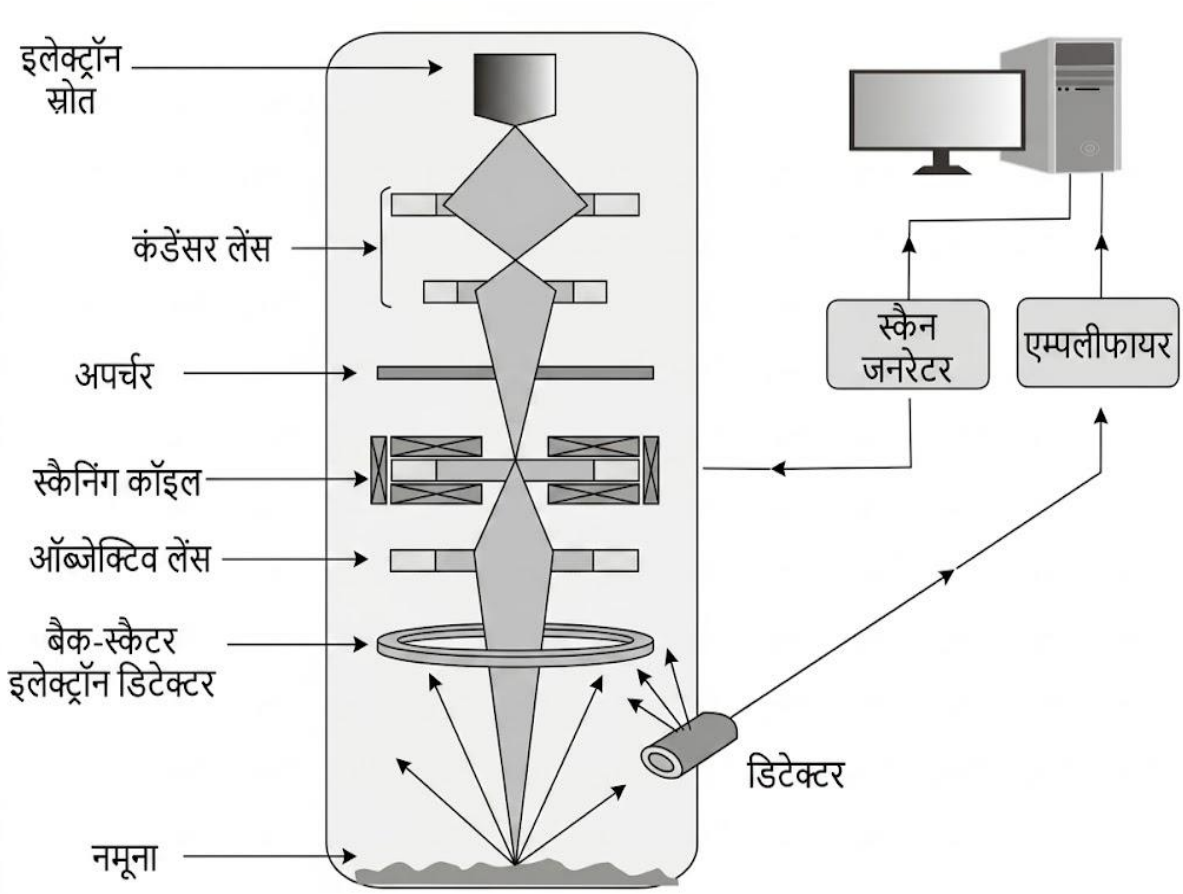
SEM के कार्य सिद्धांत में, एक इलेक्ट्रॉन गन से उच्च ऊर्जा वाले इलेक्ट्रॉनों की किरण उत्पन्न की जाती है, जिसे वैक्यूम में रखे गए सैंपल की सतह पर फोकस किया जाता है। यह इलेक्ट्रॉन बीम सैंपल की सतह पर स्कैन (scan) करती है और जब इलेक्ट्रॉन सैंपल के परमाणुओं से टकराते हैं, तो विभिन्न प्रकार के सिग्नल जैसे secondary electrons और backscattered electrons उत्पन्न होते हैं। इन सिग्नलों को डिटेक्टर द्वारा संग्रहित किया जाता है और कंप्यूटर की सहायता से इन्हें एक इमेज में परिवर्तित किया जाता है। यह इमेज सैंपल की सतह की बनावट, आकार, और संरचना को स्पष्ट रूप से दर्शाती है।

SEM से हमें कणों का आकार (particle size), सतह की संरचना (surface morphology), और सामग्री की बनावट (texture) के बारे में महत्वपूर्ण जानकारी मिलती है, इसलिए यह तकनीक नैनोकण के अध्ययन में बहुत उपयोगी मानी जाती है। **TEM (Transmission Electron Microscopy)** में इलेक्ट्रॉन बीम सैंपल के **आर-पार** गुजरती है। इसके लिए नमूना (Sample) अत्यंत पतला ($<$ 100 nm) होना चाहिए। यह तकनीक परमाणु स्तर पर **आंतरिक संरचना**, क्रिस्टल लैटिस और जाली (Lattice) के सटीक विश्लेषण के लिए बेहतरीन है, जिससे उच्च रिज़ॉल्यूशन वाली 2D इमेज प्राप्त होती है।

इसके विपरीत, **SEM (Scanning Electron Microscopy)** इलेक्ट्रॉन बीम को सैंपल की **सतह पर स्कैन** करता है। यह मुख्य रूप से सतह की

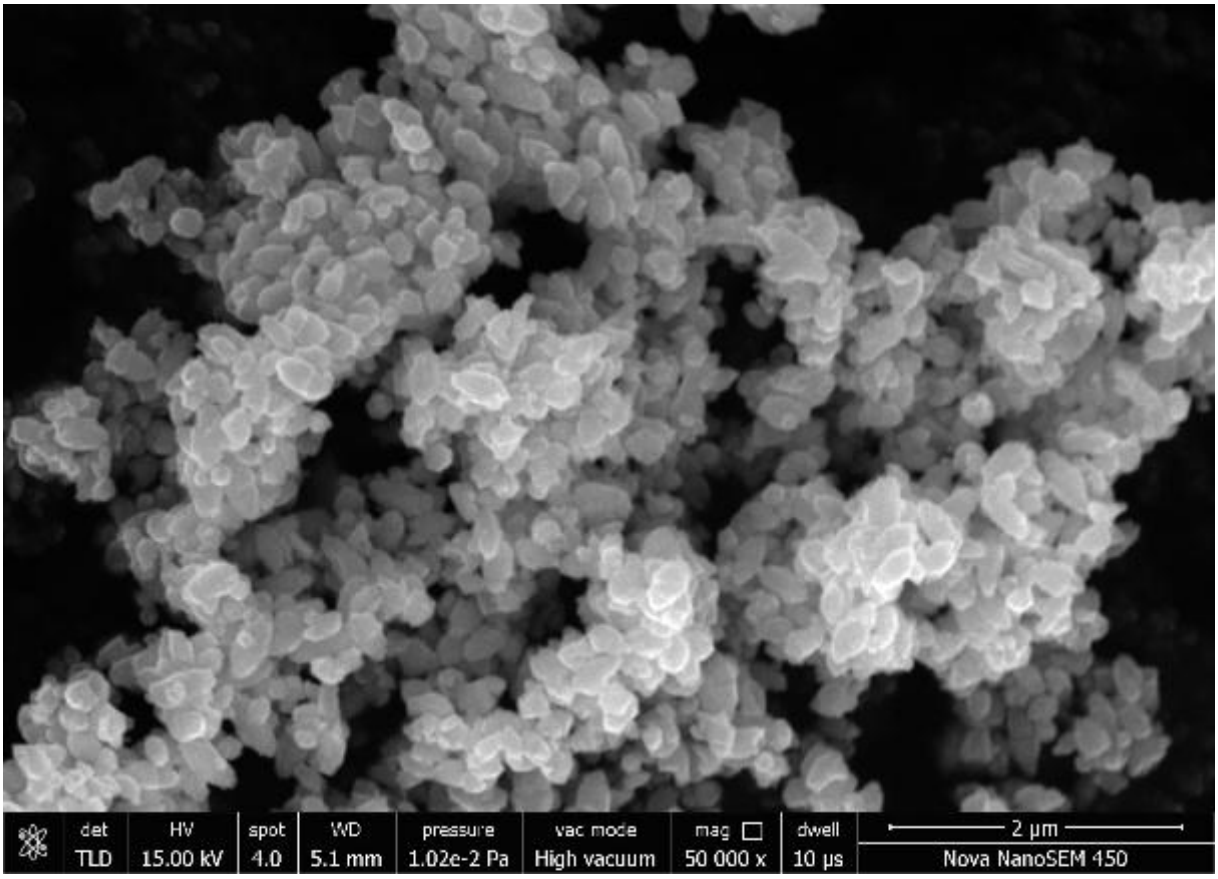
बनावट (Topography) और कणों के आकार का **3D अहसास** कराने वाली इमेज देता है। जहाँ SEM में थोड़े मोटे नमूनों का उपयोग किया जा सकता है, वहीं TEM आंतरिक विवरण और सूक्ष्म संरचनात्मक गहराई के लिए श्रेष्ठ माना जाता है।

इस पत्रिका में, हमने ZnO नैनोकण को **सोल–जेल विधि** द्वारा तैयार किया है, और प्रस्तुत SEM इमेज उन्हीं संश्लेषित नैनोकणों की संरचना एवं सतह का विश्लेषण प्रदर्शित करती है।



चित्र 12: स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM) का आरेख

यह चित्र (13) यह SEM (Scanning Electron Microscope) इमेज **Zinc Oxide (ZnO) नैनोकणों (Nanoparticles)** की शारीरिक संरचना और उनके जमाव (Morphology and Aggregation) को प्रदर्शित कर रही है। इमेज के निचले हिस्से में दिए गए डेटा के अनुसार, इसे **50,000 गुना (50,000 x)** आवर्धित किया गया है और इसमें **2 µm (माइक्रोमीटर)** का स्केल बार दिया गया है, जिससे यह स्पष्ट होता है कि व्यक्तिगत नैनोकणों का आकार लगभग **100 से 300 नैनोमीटर** के बीच है। कणों का आकार मुख्य रूप से **अंडाकार (Oval)** या **चावल के दाने (Grain-like)** जैसा दिखाई दे रहा है, जो आपस में जुड़कर गुच्छे (Clusters) बना रहे हैं, जिसे वैज्ञानिक भाषा में **'Agglomeration'** कहा जाता है। कणों की सतह काफी स्पष्ट है और उनकी बनावट एकसमान (Uniform) प्रतीत होती है, जो उच्च गुणवत्ता वाले संश्लेषण (Synthesis) को दर्शाती है। इस प्रकार की सूक्ष्म संरचना ZnO के उच्च सतह-क्षेत्र (Surface Area) को इंगित करती है, जो इसे **फोटोकैटलिसिस (Photocatalysis), गैस सेंसर और सौर सेल (Solar Cells)** जैसे अनुप्रयोगों के लिए बेहद प्रभावी बनाती है



चित्र 13: यह चित्र जिंक ऑक्साइड (ZnO) नैनोकण का SEM (स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी) इमेज दर्शाता है।

उपसंहार

इस अध्ययन में नैनोकणों (Nanoparticles) के गुण, निर्माण विधि तथा उनके अनुप्रयोगों का सफलतापूर्वक वर्णन किया गया है। नैनोकण 1–100 नैनोमीटर आकार के सूक्ष्म कण होते हैं, जिनमें उच्च सतह क्षेत्र और विशिष्ट भौतिक एवं रासायनिक गुण पाए जाते हैं, जिससे वे विभिन्न क्षेत्रों में अत्यंत उपयोगी होते हैं। इस शोध में नैनोकणों के संश्लेषण के लिए सोल-जेल विधि (Sol-Gel Method) का उपयोग किया गया। इस प्रक्रिया में प्रीकर्सर (जैसे जिंक एसीटेट) को विलायक में घोलकर सोल तैयार किया गया, जो आगे चलकर रासायनिक अभिक्रियाओं द्वारा जेल में परिवर्तित हो गया। प्राप्त जेल को सुखाकर (drying process) नैनोकण प्राप्त किए गए। इस विधि की विशेषता यह है कि इसमें कम लागत में सरल तरीके से नियंत्रित आकार एवं संरचना के नैनोकण तैयार किए जा सकते हैं। तैयार किए गए जिंक ऑक्साइड (ZnO) नैनोकण अपने उत्कृष्ट गुणों के कारण विभिन्न क्षेत्रों में उपयोगी पाए गए हैं। इनके प्रमुख अनुप्रयोगों में एंटीबैक्टीरियल गतिविधि, गैस सेंसर, ऑप्टिकल उपकरण, सोलर सेल तथा पर्यावरण शुद्धिकरण शामिल हैं। अतः निष्कर्ष रूप में कहा जा सकता है कि सोल-जेल विधि द्वारा केवल ड्राइंग प्रक्रिया अपनाकर भी प्रभावी रूप से नैनोकण तैयार किए जा सकते हैं। यह विधि सरल, किफायती और उपयोगी है, तथा इससे प्राप्त नैनोकण भविष्य में वैज्ञानिक एवं औद्योगिक क्षेत्रों में महत्वपूर्ण भूमिका निभा सकते हैं।

संदर्भ ग्रंथ सूची (Bibliography/References)

1. Sharma, S., Singh, A. K. & Singh, S. P. Synthesis and characterization of ZnO nanoparticles prepared by green routes: Controlling morphologies by maintaining pH. *Phys. Scr.* **99**, 1059b9 (2024). DOI- 10.1088/1402-4896/ad7ae2
2. Singh, S. P., Himanshi Yadav et al. Novel approach to enhance antifungal properties via formation of wavy and Sharp microstructures composed of metal oxide nanoparticles and Cdots. Scientific Reports,15:25483,1–27 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-10897-z
3. Nadeem Biag et al. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges Mater. Adv., 2, 1821-1871 (2021) DOI: 10.1039/d0ma00807a
4. Hasnidawani, J. N. et al. Synthesis of ZnO Nanostructures Using Sol-Gel Method. *Procedia Chem.* **19**, 211–216 (2016). https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.095
5. Singh, A. K. & Singh, S. P. Formation of nano and micro scale hierarchical structures in MgO and ZnO quantum dots doped LC media: The role of competitive forces. Condens. Matter Phys.26, 1–22 (2023). DOI:10.5488/CMP.26.43602
6. Ondijo, C., Kengara, et al. I. Synthesis, Characterization, and Evaluation of the Remediation Activity of Cissus quadrangularis Zinc Oxide Nanoparticle-Activated Carbon Composite on Dieldrin in Aqueous Solution. J. Nanotechnol.2022, (2022). https://doi.org/10.1155/2022/2055024
7. Dr. Satya Pal Singh, Fundamentals of Nanoscience and Nanotechnology, Ist ed. 2024, New Narosa Publishing House Pvt. Ltd, New delhi, India, ISBN: 978-81-8487-739-7