खंड ३, अंक १, मार्च –२०२६
ई–विज्ञानम
मासिक विज्ञान पत्रिका

Vol. 3, Issue 1, March-2026
e-vigyanam
Monthly Science Journal

सामान्य आलेख (General Article)

DOI: 10.66346/ev.v3i1.2026.1

ऊर्जा भंडारण अनुप्रयोगों के लिए सिल्वर नैनोरॉड्स का संश्लेषण

प्रिया कुशवाहा *, 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*- 2024103012@mmmut.ac.in

आलेख प्राप्त: १६ मई २०२६; अंतिम संशोधन: १८ जून २०२६; स्वीकृत: १६ जून २०२६
प्रथम ऑनलाइन प्रकाशित: २६ जून २०२६

सारांश

नैनोरॉड्स का ग्रीन सिंथेसिस पारंपरिक भौतिक और रासायनिक तरीकों का एक व्यवहार्य विकल्प माना जा रहा है, जो आर्थिक और पारिस्थितिक दोनों दृष्टि से लाभकारी है। इस अध्ययन में, सिल्वर नैनोरॉड्स को *Ocimum sanctum* (तुलसी) की पत्तियों का उपयोग करके तैयार किया गया। स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM) ने गोलाकार और छड़-आकार की संरचनाओं की उपस्थिति की पुष्टि की, जबकि एक्स-रे विवर्तन (XRD) ने उनके क्रिस्टलीय स्वरूप को सत्यापित किया। औसत कण आकार 15.72 nm पाया गया। जैविक रूप से संश्लेषित नैनोकणों ने मजबूत एंटीबैक्टीरियल, एंटीमाइक्रोबियल, एंटीऑक्सीडेंट और एंटी-इंफ्लेमेटरी गुण प्रदर्शित किए तथा मानव स्वास्थ्य में ड्रग डिलीवरी के लिए उपयोगी पाए गए। ये परिणाम ऊर्जा भंडारण प्रौद्योगिकियों में ग्रीन-सिंथेसाइज्ड सिल्वर नैनोकणों के उपयोग की संभावनाओं को उजागर करते हैं।

सूचक शब्द- नैनोरॉड्स, स्पेक्ट्रोस्कोपी, एक्स-रे विवर्तन, इलेक्ट्रोकेमिकल सेंसिंग, बायोइमेजिंग

खंड ३, अंक १, मार्च –२०२६
ई–विज्ञानम
मासिक विज्ञान पत्रिका

Vol. 3, Issue 1, March-2026
e-vigyanam
Monthly Science Journal

सामान्य आलेख (General Article)

DOI: 10.66346/ev.v3i1.2026.1

Synthesis of Silver Nanorods for Energy Storage Applications

Riya Kushwaha*, 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*: 2024103012@mmmut.ac.in

Received on: 19 May 2026; Final Revision: 18 Jun 2026; Accepted: 19 Jun 2026
Published Online First on: 29 Jun 2026

ABSTRACT

Green synthesis of nanorods is emerging as a viable alternative to conventional physical and chemical methods due to its economic and ecological advantages. In this study, silver nanorods were synthesized using the leaves of Ocimum sanctum. Scanning Electron Microscopy (SEM) confirmed the presence of spherical and rod-shaped structures, while X-ray Diffraction (XRD) verified their crystalline nature. The average particle size was found to be 15.72 nm. The biologically synthesized nanoparticles exhibited strong antibacterial, antimicrobial, antioxidant, and anti-inflammatory properties and were found to be useful for drug delivery in human health applications. These findings highlight the potential use of green-synthesized silver nanoparticles in energy storage technologies.

Keywords- Nanorods, Spectroscopy, X-ray Diffraction, Electrochemical Sensing, Bioimaging

1. परिचय

धातु-आधारित नैनोरॉड्स ने औद्योगिक और बायोमेडिकल अनुप्रयोगों के लिए महत्वपूर्ण रुचि आकर्षित की है।[1] इनमें, प्लेटिनम, पैलेडियम, सोना और चाँदी जैसे कीमती धातुओं का व्यापक रूप से अध्ययन किया गया है क्योंकि इनमें विशिष्ट उत्प्रेरक, इलेक्ट्रॉनिक, ऑप्टिकल और विद्युत गुण होते हैं।[2] बड़े सतह-से-आयतन अनुपात और वैलेंस तथा कंडक्शन बैंड के बीच व्यापक अंतराल के कारण, नैनोरॉड्स अक्सर परमाणु-जैसी विशेषताएँ प्रदर्शित करते हैं।[3] विशेष रूप से सिल्वर नैनोरॉड्स मौलिक अनुसंधान और औद्योगिक अनुप्रयोगों दोनों के लिए केंद्र बिंदु बन गए हैं।[4,5]

हाल के वर्षों में पर्यावरण-अनुकूल "ग्रीन" सिंथेसिस विधियाँ ध्यान आकर्षित कर रही हैं, जिनमें सूक्ष्मजीवों, एंजाइमों और पौधों के अर्क का उपयोग किया जाता है।[6] ये विधियाँ अधिक किफायती होती हैं और स्थिरता बढ़ाती हैं[1]। कई औषधीय पौधों जैसे *Acorus calamus*, *Alternanthera dentata*, *Azadirachta indica*, *Vitex negundo* आदि का उपयोग पहले ही बायोजेनिक सिल्वर नैनोरॉड्स बनाने और स्थिर करने के लिए किया जा चुका है[1]। *Ocimum sanctum* (तुलसी) पर आधारित अनुसंधान सीमित है[7]। तुलसी एक पवित्र और सुगंधित औषधीय पौधा है, जिसका पारंपरिक चिकित्सा में श्वसन रोग, बुखार, त्वचा रोग और संक्रमणों के उपचार में उपयोग होता रहा है।[8] इसकी पत्तियों से प्राप्त आवश्यक तेल में एंटीमाइक्रोबियल, एंटीऑक्सीडेंट और एंटी-इंफ्लेमेटरी गुण पाए जाते हैं, जिनमें यूजेनॉल प्रमुख जैव सक्रिय घटक है।[1]

ऊर्जा भंडारण तकनीकों में भी ग्रीन-सिंथेसाइज्ड सिल्वर नैनोरॉड्स ने संभावनाएँ दिखाई हैं।[9] उच्च विद्युत चालकता[10], उत्प्रेरक गतिविधि और स्थिरता के कारण ये सुपरकैपेसिटर, लिथियम-आयन बैटरी और फ्यूल सेल में उपयोगी हैं।[11]

चित्र 1: तुलसी (Ocimum sanctum) के अर्क और सिल्वर नाइट्रेट ($AgNO_3$) से सिल्वर नैनोरॉड्स की हरित संश्लेषण योजना

स्रोत: https://share.google/brrmjuBtBQe0RxO3g

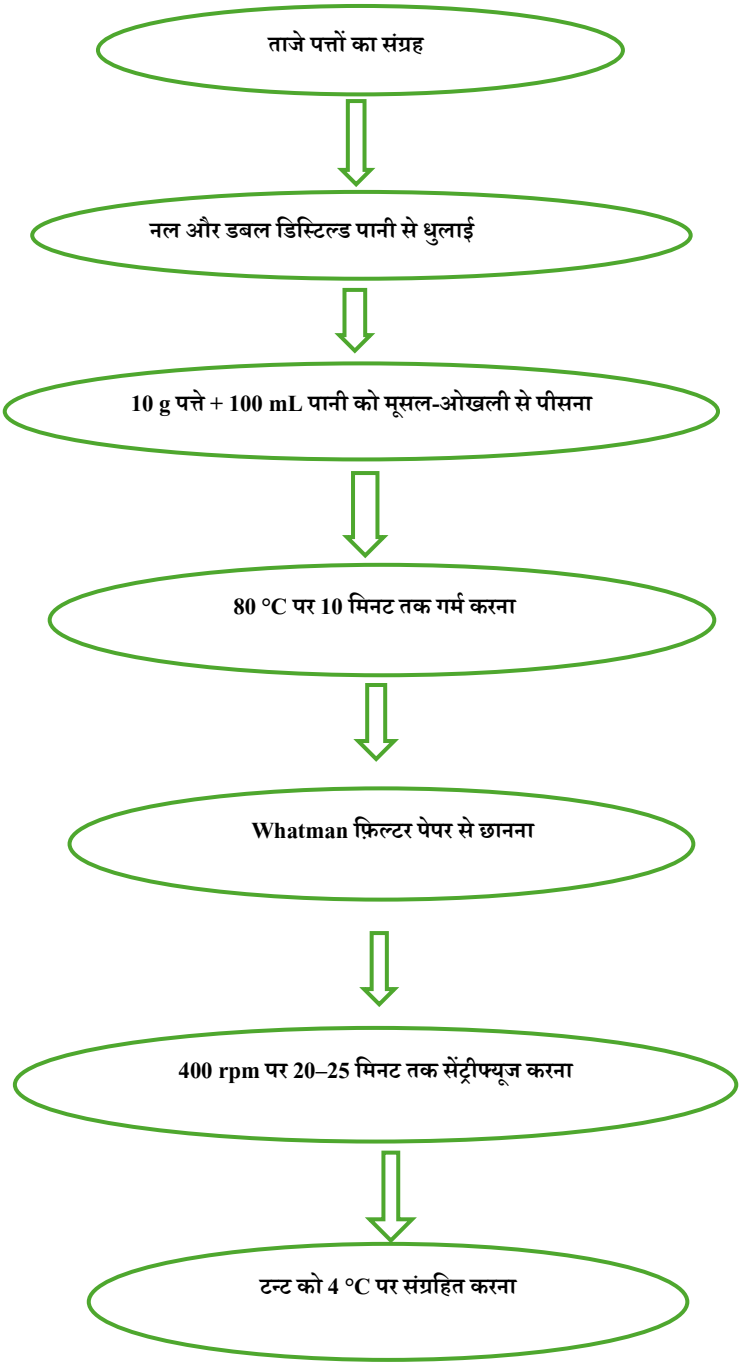
2. प्रयोगात्मक अनुभाग

पौधों का संग्रह और पहचान

Ocimum sanctum Linn. एक सुगंधित, अत्यधिक शाखित सीधा बढ़ने वाला पौधा है, जिसकी तने चौकोर, गाँठें रोएँदार और पत्तियाँ भालाकार से अंडाकार-भालाकार होती हैं। यह सामान्यतः खुले स्थानों और खेती वाले क्षेत्रों में पाया जाता है। वर्तमान अध्ययन के लिए ताजे पौधे दिसंबर (2025) माह में मदन मोहन मालवीय प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय (MMMUT), गोरखपुर, उत्तर प्रदेश के परिसर से एकत्र किए गए। नमूनों को प्रयोगशाला में एयरटाइट पॉलीथीन बैग में लाया गया।

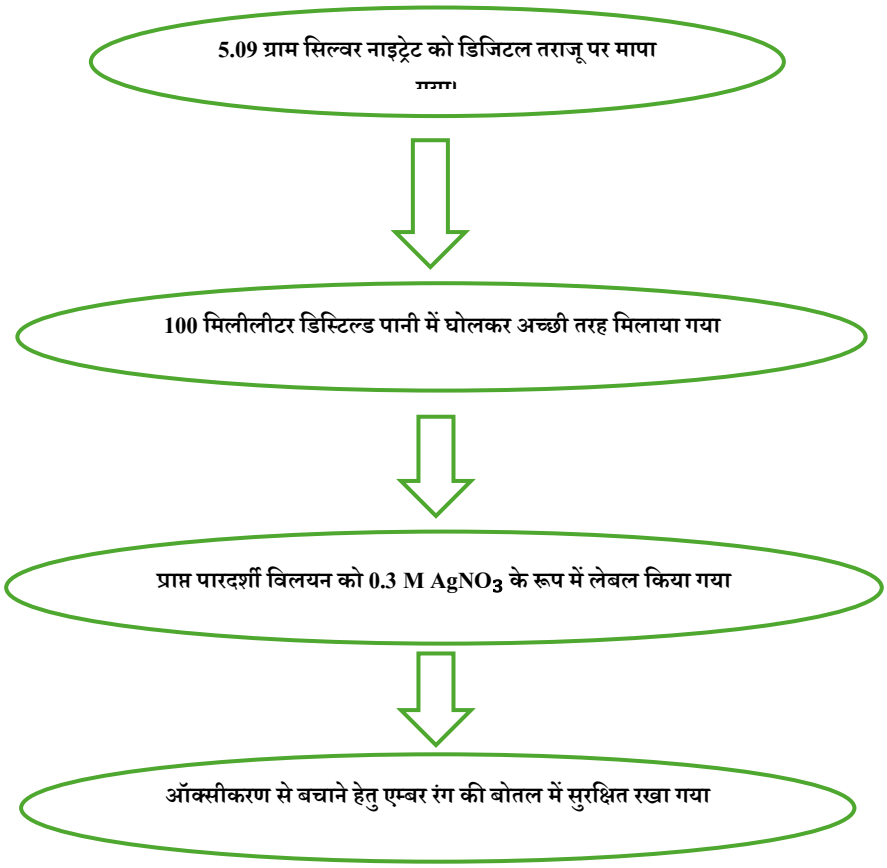
2.1. पत्तियों का अर्क तैयार करना

- ताजे पत्तों का संग्रह
- नल और डबल डिस्टिल्ड पानी से धुलाई
- 10 g पत्ते + 100 mL पानी को मूसल-ओखली से पीसना
- 80 °C पर 10 मिनट तक गर्म करना
- Whatman फ़िल्टर पेपर से छानना
- 400 rpm पर 20–25 मिनट तक सेंट्रीफ्यूज करना
- सुपरनेटन्ट को 4 °C पर संग्रहित करना



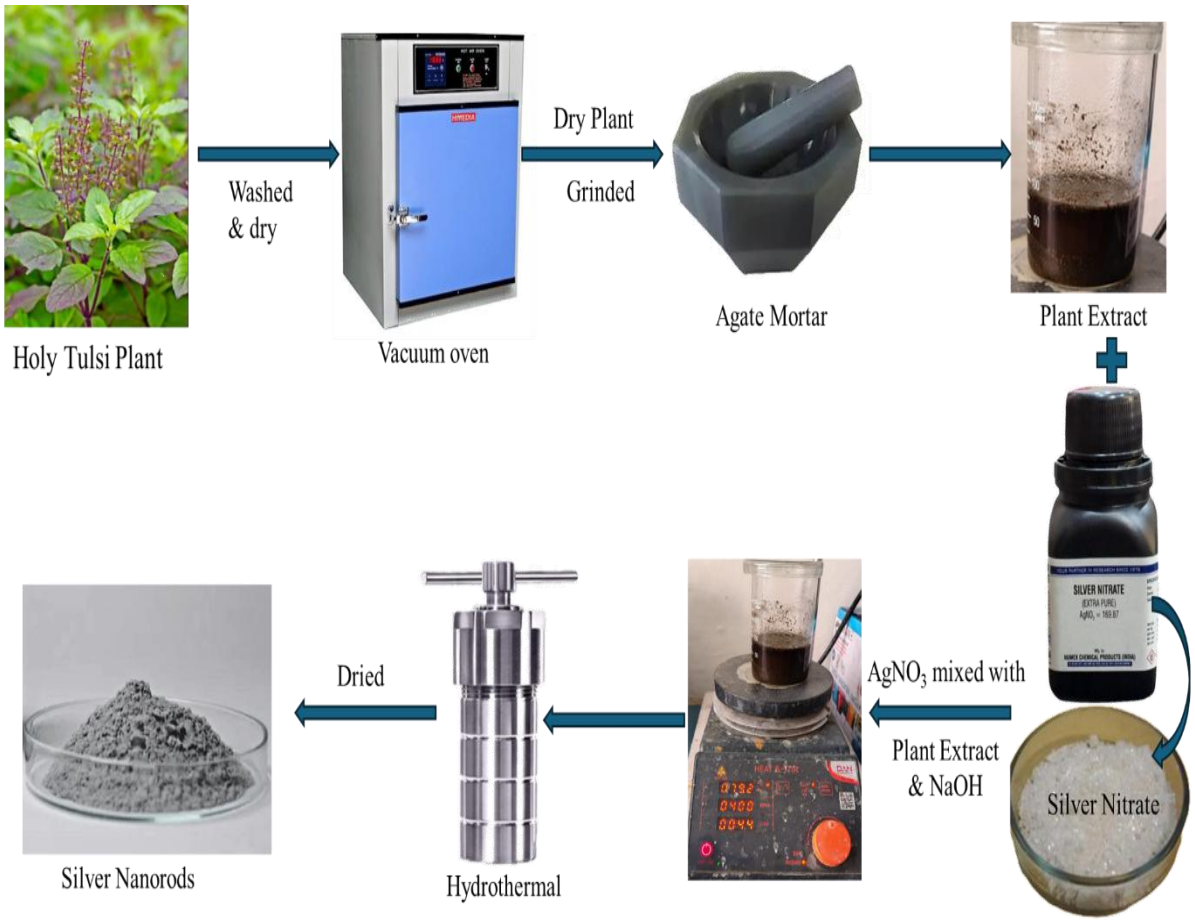
2.2. सिल्वर नाइट्रेट ($AgNO_3$) विलयन की तैयारी

- **$AgNO_3$ का तोलना** — 5.09 ग्राम सिल्वर नाइट्रेट को डिजिटल तराजू पर मापा गया।
- **पानी में घोलना** — 100 मिलीलीटर डिस्टिल्ड पानी में घोलकर अच्छी तरह मिलाया गया।
- **विलयन तैयार** — प्राप्त पारदर्शी विलयन को 0.3 M $AgNO_3$ के रूप में लेबल किया गया।
- **संग्रहण (एम्बर बोतल में)** — ऑक्सीकरण से बचाने हेतु एम्बर रंग की बोतल में सुरक्षित रखा गया।



2.3. सिल्वर नैनोरॉड्स का ग्रीन सिंथेसिस

सिल्वर नैनोरॉड्स (AgNRs) का संश्लेषण एक संशोधित एक-चरणीय विधि द्वारा किया गया। 0.3 M सिल्वर नाइट्रेट विलयन में 20 मिलीलीटर तुलसी पत्तियों का अर्क मिलाया गया। मिश्रण को 400 rpm पर 30 मिनट तक हिलाया गया और pH को NaOH से समायोजित किया गया। इसके बाद विलयन को हाइड्रोथर्मल ऑटोक्लेव में डालकर 180 °C पर 8 घंटे तक रखा गया।

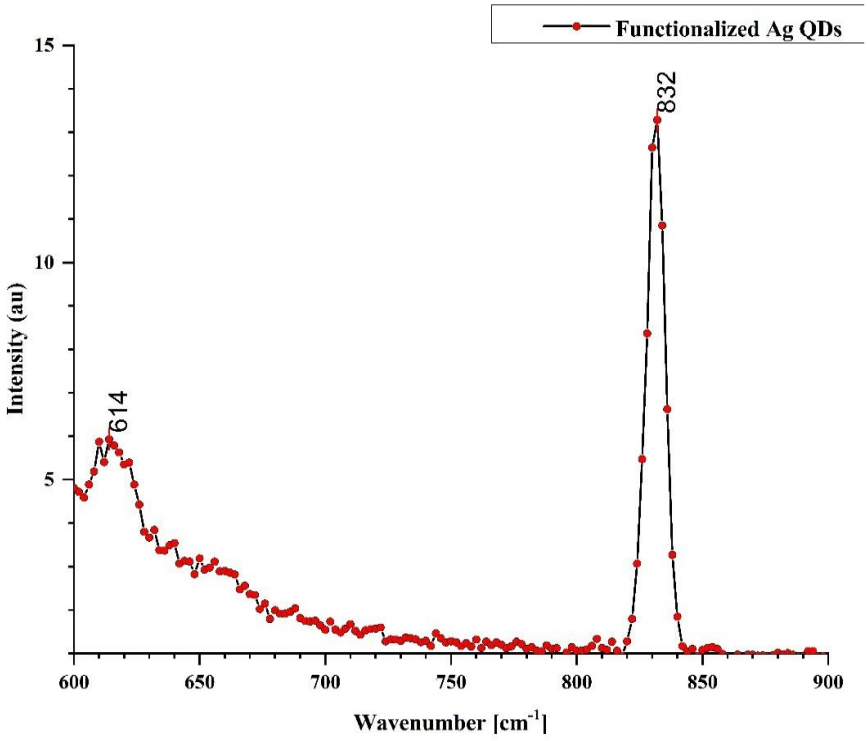


चित्र 2: सिल्वर नैनोरॉड्स संश्लेषण की योजना

3. परिणाम और चर्चा

3.1. FTIR स्पेक्ट्रोस्कोपी

FTIR स्पेक्ट्रोस्कोपी एक परिपक्व लेकिन निरंतर विकसित होती विश्लेषणात्मक तकनीक है, जो तेज़, उच्च थ्रूपुट और गैर-विनाशकारी विश्लेषण जैसी कई सुविधाएँ प्रदान करती है[12]। यह विभिन्न प्रकार के नमूनों की जाँच करने में सक्षम है और औद्योगिक तथा शोध दोनों क्षेत्रों में व्यापक रूप से प्रयुक्त होती है[13]। ग्रीन सिंथेसिस से बने सिल्वर नैनोकणों (AgNRs) के अध्ययन में FTIR का उपयोग संरचनात्मक विशेषताओं की पहचान के लिए किया गया। हाल के अध्ययनों में 3590 cm^{-1} (O–H स्ट्रेचिंग), 3070 cm^{-1} (C–H स्ट्रेचिंग), 1670 cm^{-1} (C═O स्ट्रेचिंग), और 1525 cm^{-1} (N–H बेंडिंग, अमाइड I) पर मजबूत अवशोषण बैंड दर्ज किए गए। प्रोटीन आधारित कैपिंग एजेंट्स की उपस्थिति ने कणों के एकत्रीकरण को रोका। इसके अतिरिक्त, AgNRs के स्ट्रेचिंग वाइब्रेशन ने 816 और 630 cm^{-1} पर अवशोषण शिखर उत्पन्न किए।



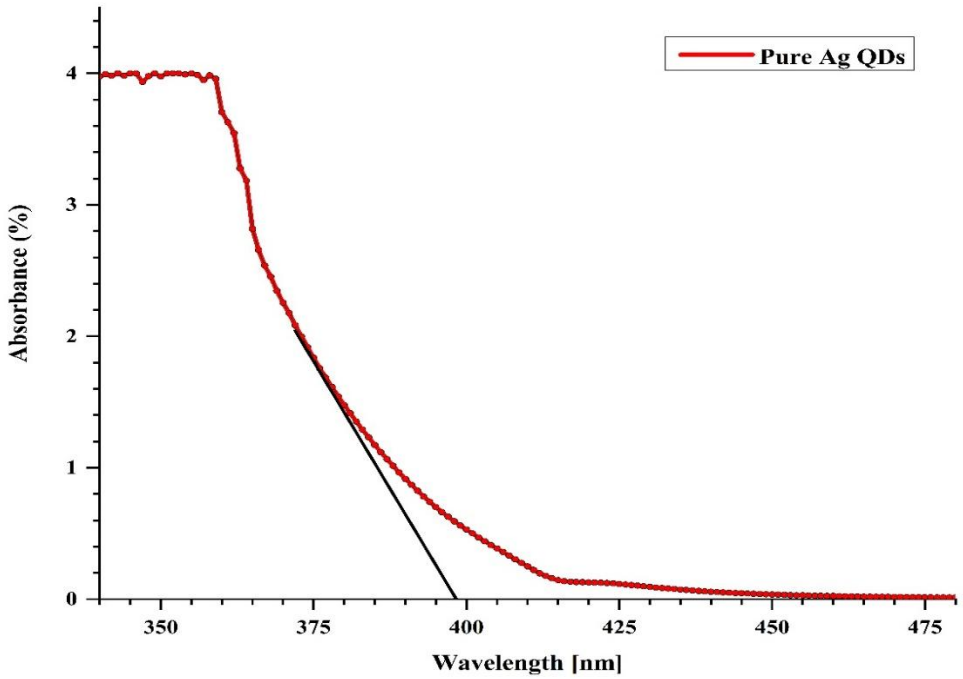
चित्र 3: एफटीआईआर ग्राफ़ [17]

3.2. UV-दृश्य स्पेक्ट्रोस्कोपी

UV–दृश्य स्पेक्ट्रोस्कोपी संश्लेषित नैनोमटेरियल्स की प्राथमिक विशेषताओं की जाँच के लिए अत्यंत उपयोगी है।[14] यह समय-कुशल, सरल और विभिन्न प्रकार के नैनोरॉड्स के लिए विशिष्ट है[15]। AgNRs की ऑप्टिकल विशेषताएँ उन्हें विशिष्ट प्रकाश आवृत्तियों के प्रति संवेदनशील बनाती हैं[8]।
Nazima et al. के अध्ययन में AgNRs का औसत शिखर 430 nm पर पाया गया।[16] इसी प्रकार Alomar के अध्ययन में भी तुलसी पत्तियों से ग्रीन सिंथेसिस द्वारा तैयार AgNRs में 430 nm पर तीव्र शिखर दर्ज किया गया।

X-अक्ष (Wavelength [nm]): 350–475 nm की सीमा में प्रकाश की तरंगदैर्ध्य दिखाई गई है।

Y-अक्ष (Absorbance %): यह बताता है कि नमूना कितनी प्रतिशत रोशनी को अवशोषित कर रहा है।



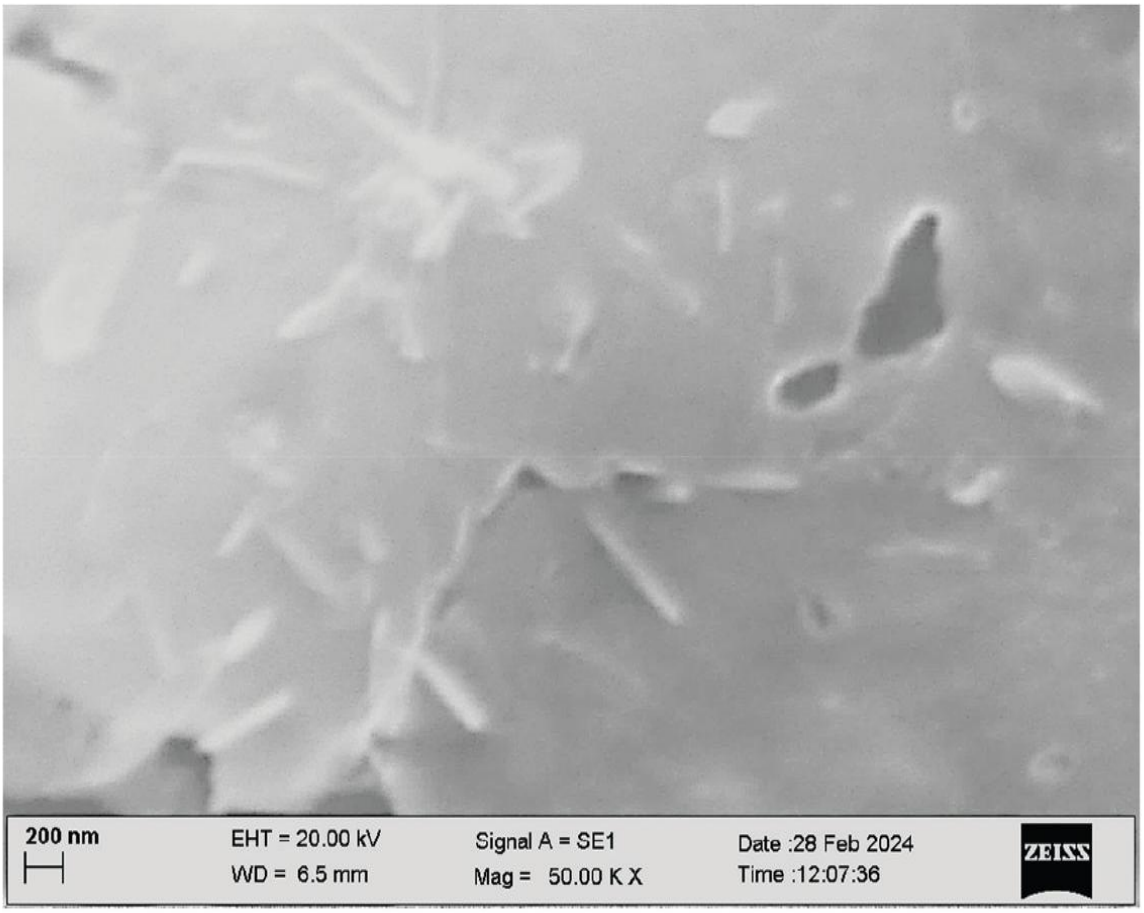
चित्र 4: दृश्य स्पेक्ट्रोस्कोपी ग्राफ़ [17]

3.3 स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM)

हमारे लैब के एक सीनियर ने सिल्वर नैनो रोड , इस तरीके से बनाया जिसमे उन्होंने सबसे पहले,0.8 wt.% कार्यात्मकीकृत (functionalized) Ag NPs को 102 µL 6CHBT लिक्विड क्रिस्टल के साथ लिया और उन्हें एथेनॉल में घोलकर 30 मिनट तक बाथ सोनिकेशन किया, ताकि एक समरूप (homogeneous) मिश्रण प्राप्त हो सके। इसके बाद इस समरूप मिश्रण को 100°C तापमान पर 4 घंटे के लिए ओवन में रखा गया, जिससे एथेनॉल पूरी तरह वाष्पित हो जाए। इस प्रक्रिया के दौरान समदैशिक (isotropic) अवस्था में कोई परिवर्तन नहीं हुआ। LC माध्यम की समदैशिक अवस्था 65°C पर दिखाई दी।

काँच की कोशिकाएँ (glass cells) दो काँच की प्लेटों को सैंडविच की तरह जोड़कर तैयार की गईं, जिनके बीच 60 µm मोटाई की मायलर (Mylar) पट्टियाँ स्पेसर के रूप में रखी गईं। लिक्विड क्रिस्टल के लक्षणन (characterisation) में 60 µm को मानक मोटाई माना जाता है, क्योंकि यह लिक्विड क्रिस्टल अणुओं के उचित संरेखण (alignment) और अभिविन्यास (orientation) को सुनिश्चित करती है। मायलर पट्टियों की यह मोटाई दृश्यमान प्रकाश (visible light) से संबंधित प्रयोगों के लिए उपयुक्त है, क्योंकि यह ट्रांसमिशन मापन के लिए पर्याप्त प्रकाश-पथ लंबाई (path length) प्रदान करती है तथा लचीलेपन और कठोरता के बीच उचित संतुलन बनाए रखती है, जिससे सेल गैप बिना विकृति के स्थिर रहता है। इसके अतिरिक्त, अधिक मोटी फिल्मों में सतह-निर्भर निकटता प्रभाव (surface-dependent proximity effect) अधिक स्पष्ट हो सकता है। इसलिए 60 µm मोटाई का चयन समान (uniform) सब्सट्रेट एंकरिंग सुनिश्चित करता है तथा फिल्मों की आकृति-विज्ञान (morphology) में होने वाले परिवर्तन मुख्यतः क्वांटम डॉट्स (QDs), लिक्विड क्रिस्टल माध्यम और सतह के पारस्परिक प्रभाव से उत्पन्न होते हैं। इस प्रकार का चयन प्रणाली में अनावश्यक जटिलताओं को कम करता है। यह मोटाई सुनिश्चित करती है कि फिल्म की आकृति-विज्ञान कणों के वितरण और अभिविन्यास, क्रिस्टलीकरण पैटर्न, तथा फेज पृथक्करण (phase separation) जैसी प्रक्रियाओं से महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित हो। 60 µm मोटाई की मायलर पट्टियाँ एक स्पष्ट और नियंत्रित मोटाई प्रदान करती हैं, जो आकृति-विज्ञान संबंधी विशेषताओं के अध्ययन के लिए आदर्श है। साथ ही, यह पूरे नमूने में समान फिल्म मोटाई प्राप्त करने में सहायता करती हैं, जो आकृति-विज्ञान संबंधी अध्ययनों में सुसंगत (consistent) और पुनरुत्पाद्य (reproducible) परिणाम प्राप्त करने के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण है।

SEM छवियों में दिखाई देने वाली रॉड-आकार (rod-like) संरचनाएँ लंबी एवं बेलनाकार (cylindrical) आकृतियों के रूप में प्रकट होती हैं, जैसा कि चित्र 11 में दर्शाया गया है। ये रॉड-आकार संरचनाएँ लिक्विड क्रिस्टल अणुओं के आकार-निर्देशक (shape-directing) प्रभावों अथवा कार्यात्मकीकरण (functionalization) करने वाले एजेंटों के प्रभाव के कारण उत्पन्न होती हैं।



चित्र 5: 0.8 wt. % फंक्शनलाइज़्ड Ag QDs डोप्ड LC मीडिया के SEM माइक्रोग्राफ़ दिखाते हैं [17]

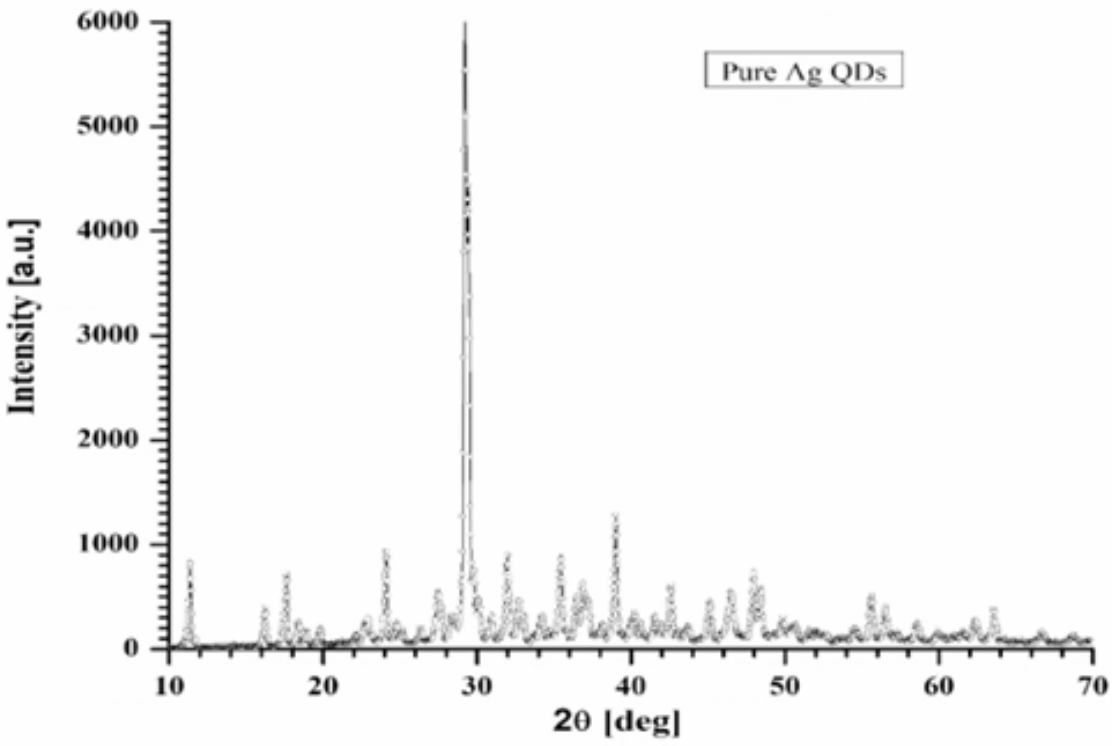
3.4. एक्स-रे विवर्तन (XRD) विश्लेषण

XRD विश्लेषण Philips PW 3050/10 उपकरण द्वारा किया गया। परिणामों से पता चला कि नैनोकण क्रिस्टलीय प्रकृति प्रदर्शित करते हैं। तीव्र शिखर से संबंधित ग्रेन [17]आकार Scherrer समीकरण द्वारा निर्धारित किया गया और औसत कण आकार 15.72 nm पाया गया[1]।

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos\theta}$$

जहाँ,

- D= क्रिस्टलाइट आकार (nm)
- K= आकार गुणांक (0.9)
- λ= एक्स-रे तरंगदैर्घ्य
- β= FWHM (रेडियन में)
- θ= ब्रैग कोण



चित्र 6: एक्स-रे विवर्तन (XRD) विश्लेषण ग्राफ़ [17]

तालिका 1: एक्स-रे विवर्तन (XRD) डेटा से सिल्वर नैनोकणों का औसत कण आकार गणना

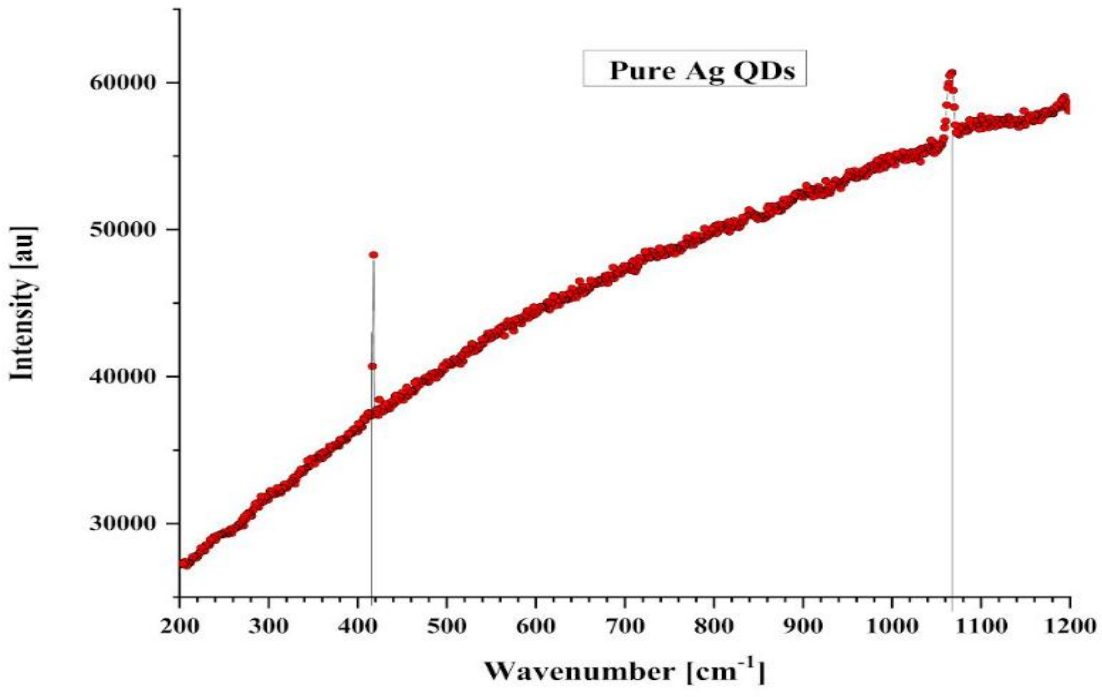
2θ	θ	in radain	sinθ	cosθ	Tanθ	β (degree)	FWHM β (radian)	2sinθ	d(spacing)	β cosθ	D (nm)	Average Particle size
27.7	13.83	0.2414103	0.2390723	0.9710018	0.246212	0.26659	0.004653	0.4781446	0.32220379	0.0045185	32.049333	
38.1	19.07	0.3327902	0.3266814	0.9451345	0.345645	0.56094	0.009792	0.6533628	0.2357955	0.0092543	15.648504	**15.725**
44.2	22.11	0.3859423	0.3764323	0.9264441	0.40632	1.4605	0.025494	0.7528646	0.20463174	0.0236186	6.1314343	
64.5	32.26	0.5630289	0.53375	0.8456423	0.631177	0.71786	0.012531	1.0675001	0.14431849	0.0105964	13.666472	
77.4	38.71	0.6757046	0.6254472	0.7802665	0.801582	0.95517	0.016673	1.2508944	0.12315987	0.0130094	11.131642	

- क्षैतिज अक्ष (X-axis) पर 2θकोण (डिग्री में) दर्शाया गया है,[17] जो 10° से 70° तक फैला है।
- ऊर्ध्वाधर अक्ष (Y-axis) पर तीव्रता (Intensity [a.u.]) दिखाई गई है, जो 0 से 6000 तक है।
- ग्राफ़ में कई विवर्तन शिखर (diffraction peaks) दिखाई देते हैं। इनमें से लगभग $2\theta \approx 30°$पर एक बहुत प्रमुख शिखर है, जो सिल्वर नैनोस्ट्रक्चर की विशिष्ट क्रिस्टलीय परावर्तन (crystalline reflection) को दर्शाता है।
- इन शिखरों से यह स्पष्ट होता है कि नमूना (sample) क्रिस्टलीय है और इसमें सिल्वर क्वांटम डॉट्स की शुद्धता तथा संरचना की पुष्टि होती है।

तालिका 2. Ag QDs (सिल्वर क्वांटम डॉट्स) की स्थिति (2θ), तीव्रता (FWHM) तथा संबंधित कण आकार को दर्शाती है।

स्थिति (2θ) (डिग्री)	ऊँचाई (काउंट्स)	FWHM (रेडियन)	कण आकार (नैनोमीटर)
11.3736	249.8501	0.02196	6.6274
17.6170	219.3642	0.02397	6.1139
24.0928	182.7880	0.02602	5.6915
29.2945	2903.8708	0.07125	2.1008
35.4505	405.0427	0.02368	6.4206
39.0121	200.3899	0.03036	5.0606
42.5888	535.1650	0.04951	3.1394
55.6093	301.4400	0.06981	2.3429
63.5806	131.4510	0.02886	5.9037
72.3752	56.8370	0.08753	2.0509

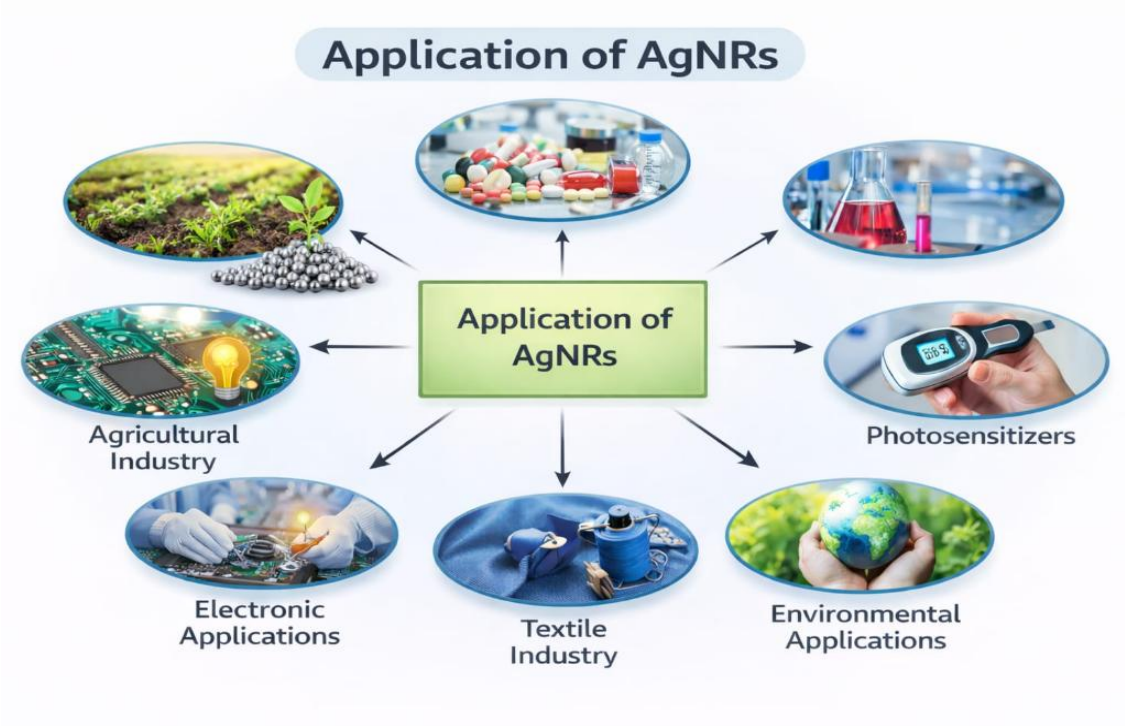
संश्लेषित Ag QDs (सिल्वर क्वांटम डॉट्स) का **न्यूनतम आकार 2.0509 nm** तथा **अधिकतम आकार 6.6274 nm** पाया गया। Ag QDs का **औसत आकार 4.5452 nm** है। HR-XRD डेटा से गणना किया गया संश्लेषित पदार्थ का आकार क्वांटम डॉट्स की सीमा में आता है। अतः यह निष्कर्ष निकाला जाता है कि **संश्लेषित पदार्थ Ag QDs (सिल्वर क्वांटम डॉट्स) है।**



चित्र 7: रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी [17]

- क्षैतिज अक्ष (X-axis) पर **वेव नंबर [cm^{-1}]** दर्शाया गया है,[17] जो लगभग 200 से 1200 cm^{-1} तक फैला है।
- ऊर्ध्वाधर अक्ष (Y-axis) पर **तीव्रता [a.u.]** दिखाई गई है, जो लगभग 30000 से 60000 तक है।
- ग्राफ़ में कुछ प्रमुख शिखर (peaks) दिखाई देते हैं, विशेषकर ~400 cm^{-1} और ~1100 cm^{-1} के आसपास।
- इन शिखरों से यह संकेत मिलता है कि सिल्वर क्वांटम डॉट्स में विशिष्ट **कंपनात्मक (vibrational) या ऑप्टिकल गुणधर्म** मौजूद हैं।
- तीव्रता का समग्र रूप से बढ़ना यह दर्शाता है कि नमूना (sample) में संरचनात्मक एवं स्पेक्ट्रोस्कोपिक विशेषताएँ स्पष्ट रूप से परिभाषित हैं।

4. सिल्वर नैनोरॉड्स के अनुप्रयोग



चित्र 8: सिल्वर नैनोरॉड्स के अनुप्रयोग

(ये चित्र AI के सहायता से बनाया गया है।)

4.1. पर्यावरणीय अनुप्रयोग

- इलेक्ट्रोकेमिकल सेंसिंग प्लेटफ़ॉर्म विषैले भारी धातु आयनों जैसे Cu(II) और Pb(II) की निगरानी के लिए प्रभावी उपकरण के रूप में पहचाने जा रहे हैं।[18] एक नया Ag MOF नैनोकॉम्पोज़िट रिफ्लक्स सिंथेसिस विधि द्वारा तैयार किया गया और ITO ग्लास सब्सट्रेट पर स्थिर किया गया[19]। इस इलेक्ट्रोड ने उल्लेखनीय संवेदनशीलता और पुनरुत्पादन क्षमता प्रदर्शित की, जिससे Cu(II) और Pb(II) आयनों का सूक्ष्म स्तर पर पता लगाया जा सका[20]।
- इसी प्रकार, Ece et al. ने Hg^{2+} आयन का पता लगाने के लिए एक सतत[7] और किफायती इलेक्ट्रोकेमिकल सेंसर विकसित किया।[21] इसमें हर्बल सिल्वर नैनोरॉड्स को फोलिक एसिड के साथ मिलाकर पेंसिल ग्रेफाइट इलेक्ट्रोड पर जमाया गया[22]। यह

सेंसर उच्च चयनात्मकता, तेज़ और संवेदनशील पहचान प्रदान करता है[9]।

4.2. कृषि अनुप्रयोग

- सिल्वर नैनोरॉड्स अपनी विशिष्ट भौतिक-रासायनिक विशेषताओं,[11] विशेषकर एंटीमाइक्रोबियल गतिविधि और पोषक तत्व अवशोषण क्षमता के कारण कृषि में उपयोगी साबित हो रहे हैं[23]। ये फसलों को बैक्टीरिया और फंगस संक्रमण से बचाते हैं और पारंपरिक कीटनाशकों पर निर्भरता कम करते हैं[24]।
- उदाहरण के लिए, Khattak et al. ने *Citrus maxima* फल के अर्क से AgNRs तैयार किए, जिन्होंने *Acid oryzae* बैक्टीरिया के विरुद्ध मजबूत एंटीबैक्टीरियल गतिविधि दिखाई।[25] इसी तरह, AgNRs ने बीज अंकुरण और पौधों के विकास में सुधार किया[26]। हालांकि, इनके पर्यावरणीय स्थायित्व और मिट्टी के जीवों पर संभावित विषाक्त प्रभावों को लेकर चिंताएँ बनी हुई हैं।[27]

4.3. इलेक्ट्रॉनिक अनुप्रयोग

- सिल्वर नैनोरॉड्स लचीली इलेक्ट्रॉनिक्स और प्रिंटेड सेंसरों के विकास में महत्वपूर्ण भूमिका निभा रहे हैं[28]। इन्हें कंडक्टिव इंक में मिलाने से विद्युत चालकता और प्रिंटिंग क्षमता बढ़ती है[29]।
- ग्राफीन [30]और सिल्वर नैनोरॉड्स आधारित हाइब्रिड इंक ने उच्च स्थिरता और चालकता प्रदर्शित की[31]। Jiang et al. ने केवल 4.68 wt% सिल्वर वाली इंक तैयार की, जिसने उत्कृष्ट चालकता और यांत्रिक स्थिरता दिखाई[32]।

4.4. फोटोसेंसिटाइज़र

- नैनोकणों का उपयोग फोटोसेंसिटाइज़र के रूप में किया जा रहा है[33], जैसे फोटोडायनामिक थेरेपी (PDT), फोटovoltaics और फोटोकैटलिसिस में।[34] सिल्वर नैनोरॉड्स अपनी मजबूत प्लास्मोनिक विशेषताओं के कारण विशेष रूप से उपयोगी हैं।[35]
- Malá et al. ने TMPyP फोटोसेंसिटाइज़र को AgNRs के साथ मिलाकर MRSA और ESBLKP बैक्टीरिया के विरुद्ध प्रभावी एंटीबैक्टीरियल गतिविधि प्रदर्शित की[36]। इसी तरह, Tabaika et al. ने AgNRs को नीली और लाल LED रोशनी के साथ मिलाकर बायोफिल्म को नष्ट किया[37]।

4.5. वस्त्र उद्योग

- सिल्वर नैनोरॉड्स वस्त्र इंजीनियरिंग में भी उपयोगी हैं। इन्हें कपड़ों में मिलाने से एंटीमाइक्रोबियल सुरक्षा, दाग-प्रतिरोध, UV शील्डिंग और रंग की स्थायित्व बढ़ती है।[38]
- इसके अलावा, AgNRs को स्मार्ट फैब्रिक्स और पहनने योग्य उपकरणों में भी शामिल किया जा रहा है,[6] जिससे चिकित्सा निगरानी और सतत फैशन में नई संभावनाएँ खुल रही हैं[39]।

5. निष्कर्ष

सिल्वर नैनोपार्टिकल्स (NPs) अपनी विशिष्ट भौतिक, रासायनिक और जैविक गुणों के कारण अत्यधिक लोकप्रिय हो गए हैं, जो उनके आकार, आकृति और संश्लेषण विधियों से प्रभावित होते हैं। उनका छोटा आकार और बड़ा सतही क्षेत्र एंटीमाइक्रोबियल गतिविधि, प्रकाशीय गुणों और विद्युत चालकता को बढ़ाता है, जिससे वे बायोइमेजिंग, घाव उपचार, औषधि वितरण और सेंसर प्रौद्योगिकियों जैसी विविध अनुप्रयोगों के लिए आदर्श बन जाते हैं। छोटे सिल्वर NPs कोशिकाओं में अधिक संचय और जीवाणुनाशक क्षमता प्रदर्शित करते हैं, जबकि बड़े कणों को विशेष अनुप्रयोगों जैसे घाव उपचार में प्राथमिकता दी जाती है ताकि ऊतक में प्रवेश को नियंत्रित किया जा सके।सतही आवेश और फंक्शनलाइज़ेशन कोशिकीय अंतःक्रियाओं और लक्ष्यीकरण को बढ़ाने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं, जिससे औषधि वितरण और इमेजिंग में उनका उपयोग संभव होता है। संशोधित सतहें जैवउपलब्धता, विशिष्टता और प्रणाली की स्थिरता में सुधार करती हैं, साथ ही एकत्रीकरण के जोखिम को कम करती हैं। ये विशेषताएँ सिल्वर NPs को डायग्नोस्टिक्स, चिकित्सीय वितरण और बायोसेंसिंग में उपयोग के लिए अत्यधिक बहुमुखी बनाती हैं।

लोकलाइज़्ड सरफेस प्लाज़्मन रेज़ोनेंस (LSPR) इमेजिंग और सेंसिंग अनुप्रयोगों में उनकी प्रभावशीलता को और बढ़ाता है। संश्लेषण विधियाँ सिल्वर NPs के गुणों और अनुप्रयोगों को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करती हैं। जहाँ रासायनिक और भौतिक विधियाँ बड़े पैमाने पर उत्पादन की क्षमता प्रदान करती हैं, वहीं **ग्रीन (जैविक) संश्लेषण विधियाँ** पर्यावरण-अनुकूल, लागत-प्रभावी और सुरक्षित विकल्प उपलब्ध कराती हैं। इस प्रकार, संश्लेषण की विधि का चयन सीधे तौर पर उनके गुणों और संभावित उपयोगों को निर्धारित करता है|

संदर्भ ग्रंथ सूची (Bibliography/References)

1. Sati, A., Ranade, T. N., Mali, S. N., Ahmad Yasin, H. K. & Pratap, A. Silver Nanoparticles (AgNPs): Comprehensive Insights into Bio/Synthesis, Key Influencing Factors, Multifaceted Applications, and Toxicity─A 2024 Update. *ACS Omega* **10**, 7549–7582 (2025).
2. Vega-Baudrit, J., Gamboa, S. M., Rojas, E. R. & Martinez, V. V. Synthesis and characterization of silver nanoparticles and their application as an antibacterial agent. *Int. J. Biosens. Bioelectron.* **5**, (2019).
3. Siti, S. S. *et al.* Zinc oxide nanorods-based immuno-field-effect transistor for human serum albumin detection. *J. Mater. Sci.* **56**, 15344–15353 (2021).
4. Singh, S. P., Yadav, H., Chauhan, H. & Hada, V. Novel approach to enhance antifungal properties via formation of wavy and Sharp microstructures composed of metal oxide nanoparticles and Cdots. 1–27 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-10897-z
5. 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
6. Gao, Y. *et al.* Advances in gold and silver nanoparticles-based flexible SERS sensors: Fabrication, applications, and future directions. *Nano Res.* **94908096**, 1–22 (2025).
7. Jegadeeswaran, P., Shivaraj, R. & Venckatesh, R. Green synthesis of silver nanoparticles from extract of Padina tetrastromatica leaf. *Dig. J. Nanomater. Biostructures* **7**, 991–998 (2012).
8. Sharma, N. K. *et al.* Green Route Synthesis and Characterization Techniques of Silver Nanoparticles and Their Biological Adeptness. *ACS Omega* **7**, 27004–27020 (2022).
9. Kaabipour, S. & Hemmati, S. A review on the green and sustainable synthesis of silver nanoparticles and one-dimensional silver nanostructures. *Beilstein J. Nanotechnol.* **12**, 102–136 (2021).
10. Tailor, G., Yadav, B. L., Chaudhary, J., Joshi, M. & Suvalka, C. Green synthesis of silver nanoparticles using Ocimum canum and their anti-bacterial activity. *Biochem. Biophys. reports* **24**, 100848 (2020).
11. Rafique, M., Sadaf, I., Rafique, M. S. & Tahir, M. B. A review on green synthesis of silver nanoparticles and their applications. *Artif. Cells, Nanomedicine Biotechnol.* **45**, 1272–1291 (2017).
12. Remya, V. R., Abitha, V. K., Rajput, P. S., Rane, A. V & Dutta, A. Silver Nanoparticles Green Synthesis: A Mini Review. *Chem. Int.* **3**, 165–171 (2019).
13. Bai, W., Sheng, Q., Ma, X. & Zheng, J. Synthesis of Silver Nanoparticles Based on Hydrophobic Interface Regulation and Its Application of Electrochemical Catalysis. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **3**, 1600–1609 (2015).
14. Geoprincy, G., Vidhya Srri, B. N., Poonguzhali, U., Nagendra Gandhi, N. & Renganathan, S. A review on green synthesis of silver nanoparticles. *Asian J. Pharm. Clin. Res.* **6**, 8–12 (2013).
15. Tailor, G., Yadav, B. L., Chaudhary, J., Joshi, M. & Suvalka, C. Green synthesis of silver nanoparticles using Ocimum canum and their anti-bacterial activity. *Biochem. Biophys. Reports* **24**, 100848 (2020).
16. Gu, X., Nie, C., Lai, Y. & Lin, C. Synthesis of silver nanorods and nanowires by tartrate-reduced route in aqueous solutions. *Mater. Chem. Phys.* **96**, 217–222 (2006).
17. Mishra, M. K. & Singh, S. P. Dispersion and self-assembly of 2 , 5- functionalized silver QDs in 6 CHBT liquid crystal. *Liq. Cryst.* **00**, 1–18 (2024).
18. Jakab, A. *et al.* Highly sensitive plasmonic silver nanorods. *ACS Nano* **5**, 6880–6885 (2011).
19. Wang, G. *et al.* Antibacterial effects of titanium embedded with silver nanoparticles based on electron-transfer-induced reactive oxygen species. *Biomaterials* **124**, 25–34 (2017).
20. Marimuthu, S. *et al.* Evaluation of green synthesized silver nanoparticles against parasites. *Parasitol. Res.* **108**, 1541–1549 (2011).
21. Luqman, M., Alharthi, M. A., Shakeel, N., Imran Ahamed, M. & Inamuddin. A quick, easy

and green hydrothermal method for the development of a bioanode based on a ternary nanocomposite for enzymatic biofuel cell applications. *Mater. Sci. Eng. B* **300**, 117107 (2024).
22. Shalaby, M. S., Abdallah, H., Chetty, R., Kumar, M. & Shaban, A. M. Silver nano-rods: Simple synthesis and optimization by experimental design methodology. *Nano-Structures and Nano-Objects* **19**, 100342 (2019).
23. Sharma, V. K., Yngard, R. A. & Lin, Y. Silver nanoparticles: Green synthesis and their antimicrobial activities. *Adv. Colloid Interface Sci.* **145**, 83–96 (2009).
24. Hyperlipidemia, D. Academic Sciences. **6**, 4–7 (2013).
25. Bindhu, M. R. & Umadevi, M. Antibacterial and catalytic activities of green synthesized silver nanoparticles. *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* **135**, 373–378 (2015).
26. Jana, N. R., Gearheart, L. & Murphy, C. J. Wet chemical synthesis of silver nanorods and nanowires of controllable aspect ratio. *Chem. Commun.* 617–618 (2001) doi:10.1039/b100521i.
27. Vijayaraghavan, K. & Nalini, S. P. K. Biotemplates in the green synthesis of silver nanoparticles. *Biotechnol. J.* **5**, 1098–1110 (2010).
28. Zhang, G. *et al.* Morphology-controlled green synthesis of single crystalline silver dendrites, dendritic flowers, and rods, and their growth mechanism. *Cryst. Growth Des.* **11**, 2493–2499 (2011).
29. Chun Song, X., Jin Tong, Y., Fan Zheng, Y. & Yong Yin, H. Hydrothermal Synthesis and Electrocatalytic Application of the Ag Nanorods. *Curr. Nanosci.* **8**, 608–611 (2012).
30. Abdelghany, A. M., Nagi, Y., Oraby, A. H., Abdelaziz, M. & Abdelrazek, E. M. Green hydrothermal synthesis and optimization of gold/silver core-shell nanoparticles using thyme extract. *J. Umm Al-Qura Univ. Appl. Sci.* (2025) doi:10.1007/s43994-025-00268-9.
31. Priyadarshini, S., Sulava, S., Bhol, R. & Jena, S. Green synthesis of silver nanoparticles using Azadirachta indica and Ocimum sanctum leaf extract. *Curr. Sci.* **117**, 1300–1307 (2019).
32. Zhao, Y., Kumar, A. & Yang, Y. Unveiling practical considerations for reliable and standardized SERS measurements: lessons from a comprehensive review of oblique angle deposition-fabricated silver nanorod array substrates. *Chem. Soc. Rev.* **53**, 1004–1057 (2023).
33. Ahmad, S. *et al.* Green nanotechnology: A review on green synthesis of silver nanoparticles — An ecofriendly approach. *Int. J. Nanomedicine* **14**, 5087–5107 (2019).
34. Parmar Anil Kr, S. Green Synthesis of Silver Nanoparticles using Indian Tulsi Leaves (Ocimum teniflorum) at Room Temperature & Normal pH and its Study under Different Characterization Tools. *Int. J. Sci. Res.* **13**, 558–564 (2024).
35. Jiu, J., Murai, K., Kim, D., Kim, K. & Suganuma, K. Preparation of Ag nanorods with high yield by polyol process. *Mater. Chem. Phys.* **114**, 333–338 (2009).
36. Allafchian, A. R., Mirahmadi-Zare, S. Z., Jalali, S. A. H., Hashemi, S. S. & Vahabi, M. R. Green synthesis of silver nanoparticles using phlomis leaf extract and investigation of their antibacterial activity. *J. Nanostructure Chem.* **6**, 129–135 (2016).
37. Lee, G. J., Shin, S. Il, Kim, Y. C. & Oh, S. G. Preparation of silver nanorods through the control of temperature and pH of reaction medium. *Mater. Chem. Phys.* **84**, 197–204 (2004).
38. Abdelghany, T. M. *et al.* Recent Advances in Green Synthesis of Silver Nanoparticles and Their Applications: About Future Directions. A Review. *Bionanoscience* **8**, 5–16 (2018).
39. Facibeni, A. Silver Nanoparticles: Synthesis, Properties, and Applications. *Silver Nanoparticles Synth. Prop. Appl.* 1–264 (2023) doi:10.1201/9781003278955.