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

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

सामान्य आलेख- प्रौद्योगिकी (General Article-Technology)

DOI: 10.66346/ev.v3i1.2026.5

डहलिया पत्ती अर्क से हरित-संश्लेषित ZnO नैनोकण: संरचनात्मक, प्रकाशीय, वेट्टेबिलिटी एवं तापमान-निर्भर केशिकीय द्रव परिवहन का अध्ययन

अवनीश मिश्रा, कु. खुशबू सिंह, सत्य पाल सिंह*
भौतिकी एवं पदार्थ विज्ञान विभाग, मदन मोहन मालवीय प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय, गोरखपुर, उ०प्र०, भारत-273010
लेखक से संवाद के लिए ईमेल*- singh.satyapal.pmsd@gmail.com, singh.satyapal@hotmail.com

आलेख प्राप्त: १७ जून २०२६; अंतिम संशोधन: २८ जून २०२६; स्वीकृत: ३० जून २०२६
प्रथम ऑनलाइन प्रकाशित: ३० जून २०२६

सारांश

सतह रसायन (Surface Chemistry) को अनुकूलित करने हेतु नैनोकण (Nanoparticle) कोटिंग्स पर आधारित अनुसंधान ने हाल के वर्षों में व्यापक ध्यान आकर्षित किया है। नैनोकण कोटिंग्स यांत्रिक, विद्युत, प्रकाशीय तथा अग्निरोधी गुणों में सुधार प्रदान करती हैं, जिसके कारण इनका उपयोग विभिन्न औद्योगिक क्षेत्रों में व्यापक रूप से किया जाता है। इसके अतिरिक्त, इनका उपयोग जल-विकर्षी (Hydrophobic) एवं खरोंच-प्रतिरोधी सतहों के निर्माण में भी किया जाता है। विभिन्न नैनो-सामग्रियों में जिंक ऑक्साइड (ZnO) नैनोकण लगभग 3.3 eV के विस्तृत बैंड गैप के कारण विशेष महत्व रखते हैं और अनेक क्षेत्रों में उपयोग किए जाते हैं। साथ ही, नैनोकण कोटिंग्स लेपित सतहों एवं इंटरफेस की आयु, स्थायित्व तथा यांत्रिक स्थिरता को बढ़ाती हैं। वर्तमान अध्ययन में, डहलिया (*Dahlia*) पत्तियों के अर्क की सहायता से संश्लेषित ZnO नैनोकणों को 1.15 मिमी बाहरी व्यास वाली काँच की केशिका (Glass Capillary) नलिकाओं की आंतरिक सतह पर लेपित किया गया। इस कोटिंग का उद्देश्य सतह को जल-विकर्षी बनाना तथा केशिकीय क्रिया (Capillarity) पर इसके प्रभाव का अध्ययन करना था। ZnO नैनोकण कोटिंग के केशिकीय व्यवहार पर प्रभाव का मूल्यांकन करने के लिए तीन विभिन्न द्रवों—डी-आयोनाइज्ड जल (DW), मेथेनॉल तथा एथेनॉल—का उपयोग करते हुए तुलनात्मक अध्ययन किया गया। संश्लेषित ZnO नैनोकणों का विश्लेषण फूरियर ट्रांसफॉर्म इन्फ्रारेड (FTIR) स्पेक्ट्रोस्कोपी द्वारा रासायनिक संघटन एवं शुद्धता की जाँच हेतु, एक्स-रे विवर्तन (XRD) द्वारा उनकी क्रिस्टलीय प्रकृति के अध्ययन हेतु, UV–Vis–NIR स्पेक्ट्रोस्कोपी द्वारा प्रकाशीय गुणों एवं बैंड गैप के निर्धारण हेतु तथा स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM) द्वारा सतही संरचना एवं आकृति-विज्ञान के विश्लेषण हेतु किया गया। प्राप्त परिणाम दर्शाते हैं कि जैव-संश्लेषित ZnO नैनोकण कोटिंग्स काँच की सूक्ष्म-नलिकाओं में सतह की वेट्टेबिलिटी (Wettability) को नियंत्रित करने तथा केशिकीय व्यवहार को अनुकूलित करने की महत्वपूर्ण क्षमता रखती हैं।

सूचक शब्द - ZnO नैनोकण, डहलिया पत्तियाँ, वेट्टेबिलिटी, केशिकीय क्रिया , जल-विकर्षी सतह, जैव-संश्लेषण।

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

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

सामान्य आलेख- प्रौद्योगिकी (General Article-Technology)

DOI: 10.66346/ev.v3i1.2026.5

Green-Synthesized ZnO Nanoparticles from Dahlia pinnata Leaf Extract: Structural, Optical, and Capillary-Driven Fluid Transport Studies under Variable Temperature Conditions

Avanish Mishra, Km. Khushboo Singh, Satya Pal Singh*

Department of Physics and Material Science, Madan Mohan Malaviya University of Technology Gorakhpur, Uttar Pradesh, India – 273010
Corresponding Author Email*: singh.satyapal.pmsd@gmail.com, singh.satyapal@hotmail.com

Received On: 17 Jun 2026; Final Revision: 28 Jun 2026; Accepted On: 30 Jun 2026
Published Online First: 30 Jun 2026

ABSTRACT

Research focused on nanoparticle coatings for tailoring surface chemistry has gained significant attention in recent years. Nanoparticle coatings offer enhanced mechanical, electrical, and optical properties as well as fire protection, and are widely used in various industrial sectors. These are also used to create hydrophobic scratch-proof surfaces. ZnO nanoparticles have extensive applications in diverse fields owing to their wide bandgap of approximately 3.3 eV. Nanoparticle coatings increase the lifetime and mechanical stability of the coated substrates and interfaces. In this study, we have coated ZnO nanoparticles on the inner surface of glass capillary tubes with an outer diameter of 1.15 mm and have introduced hydrophobicity to enhance capillarity. A segregated study was conducted to determine the effects of ZnO NPs coating on capillarity using three different liquids: deionized water (DW), methanol, and ethanol. ZnO NPs were prepared using Dahlia leaves. We performed characterizations using FTIR for chemical composition and purity, XRD to study the crystalline nature of ZnO NPs, UV-vis-NIR spectroscopy to characterize their optical and bandgap properties, and SEM for surface morphology analysis.

Keyword: ZnO nanoparticles, Dahlia leaves, Wettability, Capillarity, Hydrophobic Surface

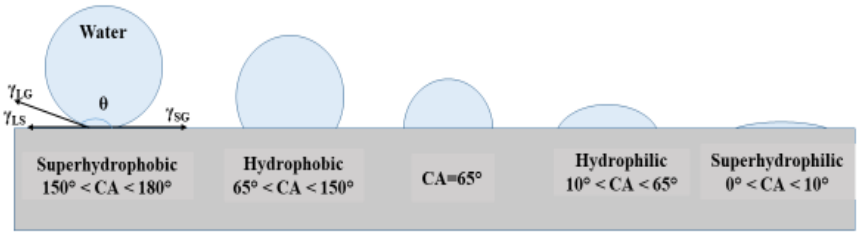
1.0 परिचय (Introduction)

15वीं शताब्दी में केशिकीय क्रिया (Capillary Action) का सर्वप्रथम अवलोकन **लियोनार्डो दा विंची** द्वारा किया गया था, जिसे बाद में **निकोलो अग्यून्टी**, **थॉमस यंग**, **गैलीलियो** तथा **अल्बर्ट आइंस्टीन** ने वैज्ञानिक रूप से स्पष्ट किया। इसके पश्चात अग्यून्टी ने यंग-लाप्लास समीकरण (Young-Laplace Equation) का मात्रात्मक विश्लेषण प्रस्तुत किया [1]। 20वीं शताब्दी तक अधिकांश अनुसंधान केशिका नलिकाओं में स्वस्फूर्त केशिकीय प्रवाह (Spontaneous Capillary Flow) के लिए उत्तरदायी भौतिक तंत्रों को समझने पर केंद्रित थे [2]। 21वीं शताब्दी में नैनोप्रौद्योगिकी (Nanotechnology) एक महत्वपूर्ण वैज्ञानिक अनुसंधान क्षेत्र के रूप में उभरी है, जिसका मुख्य उद्देश्य 100 nm से छोटे पदार्थों का निर्माण एवं नियंत्रण है। इसने कृषि, जैव-प्रौद्योगिकी, चिकित्सा तथा अन्य अनेक क्षेत्रों में क्रांतिकारी परिवर्तन किए हैं [3–5]। नैनोकणों (Nanoparticles) के अद्वितीय गुण, जो उनके अत्यंत छोटे आकार तथा उच्च सतह-क्षेत्र-से-आयतन अनुपात के कारण उत्पन्न होते हैं, द्रव गतिकी (Fluid Dynamics), सतही कार्यात्मकता (Surface Functionalities), अपशिष्ट जल उपचार तथा रोगाणुरोधी एजेंटों जैसे अनुप्रयोगों में महत्वपूर्ण प्रगति को संभव बनाते हैं [6,7]। नैनो-सामग्रियों (Nanomaterials) ने अपने नवीन, बहुउद्देशीय तथा नियंत्रित किए जा सकने वाले गुणों के कारण उपकरण निर्माण (Device Manufacturing) के क्षेत्र में महत्वपूर्ण विकास किया है। वर्तमान अनुसंधान विशेष रूप से जिंक ऑक्साइड (ZnO) नैनोकणों के उपयोग पर केंद्रित है, जिन्हें केशिका नलिकाओं की कोटिंग में प्रयोग कर उनकी कार्यक्षमता बढ़ाई जा सकती है। ZnO नैनोकण पर्यावरणीय सुधार (Environmental Remediation), जैव-चिकित्सीय अनुप्रयोगों, इलेक्ट्रॉनिक्स तथा ऊर्जा भंडारण जैसे क्षेत्रों में उपयोगी हैं, जिससे विभिन्न औद्योगिक क्षेत्रों में नवाचार को बढ़ावा मिलता है [8,9]। नैनोकणों के गुण एवं अनुप्रयोग अनेक क्षेत्रों में उपयोग किए जाते हैं, जैसे सैंडविच संरचनाएँ (Foam Structures), सुरक्षात्मक कोटिंग्स [10], नैनो-इलेक्ट्रोमैकेनिकल सिस्टम (NEMS), रेडियो-फ्रीक्वेंसी माइक्रो-इलेक्ट्रोमैकेनिकल सिस्टम (RF-MEMS), LCD, चालक नलिकाएँ एवं सेंसर [11], फोटोवोल्टाइक उपकरण, पवन टरबाइन, बैटरियाँ एवं ईंधन सेल [12], जल शुद्धिकरण एवं गैस पृथक्करण झिल्लियाँ तथा अवशोषक सामग्री [13], खेल उपकरण जैसे टेनिस रैकेट, हॉकी स्टिक, क्रिकेट बैट तथा शीतकालीन खेलों हेतु तापीय वर्दियाँ [14]। अत्यधिक जल-विकर्षी (Superhydrophobic) सामग्रियाँ, जो तेल एवं जल के प्रभावी तथा तीव्र पृथक्करण में सक्षम होती हैं और दीर्घकालिक स्थायित्व प्रदान करती हैं, वर्तमान समय में वैश्विक अनुसंधान का प्रमुख विषय बन गई हैं। पारंपरिक त्रि-आयामी अवशोषक सामग्रियाँ अत्यधिक पर्यावरणीय परिस्थितियों में अपनी कार्यक्षमता खो देती हैं, जिससे तेल-जल पृथक्करण की प्रभावशीलता प्रभावित होती है और उनके उपयोग का दायरा सीमित हो जाता है। औद्योगीकरण के तीव्र विस्तार के साथ समुद्री तेल रिसाव तथा औद्योगिक अपशिष्ट जल जैसी समस्याएँ बढ़ती जा रही हैं। परंपरागत तेल-जल पृथक्करण तकनीकें अक्सर कम दक्षता वाली होती हैं और द्वितीयक पर्यावरणीय प्रदूषण का कारण बन सकती हैं [15–17]। इसलिए अधिक प्रभावी तथा पर्यावरण-अनुकूल तेल-जल पृथक्करण तकनीकों का विकास वर्तमान समय में वैज्ञानिकों के लिए एक प्रमुख अनुसंधान विषय बन गया है [18,19]। वर्तमान तेल-जल पृथक्करण विधियाँ, जैसे गुरुत्वीय पृथक्करण (Gravity Separation), रासायनिक ऑक्सीकरण (Chemical Oxidation) तथा जैव-उपचार (Bioremediation), कम स्थिरता, कम दक्षता तथा द्वितीयक प्रदूषण जैसी समस्याओं से ग्रस्त हैं, जिससे नवीन समाधानों की आवश्यकता स्पष्ट होती है [20,21]। इसके अतिरिक्त, जल संकट एवं पर्यावरणीय प्रदूषण जैसी वैश्विक चुनौतियों के बढ़ने के साथ स्वच्छ जल की मांग भी निरंतर बढ़ रही है [22,23]। सौर वाष्पीकरण प्रणालियाँ (Solar Evaporators), जो उच्च दक्षता, ऊर्जा संरक्षण तथा पर्यावरण-अनुकूल विशेषताओं के लिए जानी जाती हैं, ऊर्जा एवं जल संबंधी समस्याओं के समाधान के रूप में उभरकर सामने आई हैं [24,25]। सौर ऊर्जा आधारित इंटरफेशियल वाष्पीकरण प्रणालियाँ समुद्री जल विलवणीकरण (Desalination) तथा अपशिष्ट जल उपचार के लिए अत्यंत संभावनाशील हैं, किन्तु उनकी एकल संरचना (Monolithic Structure) तथा जटिल निर्माण प्रक्रिया उनके व्यापक उपयोग में बाधा उत्पन्न करती है। अतः उच्च दक्षता एवं स्थिर फोटोथर्मल प्रदर्शन वाली बहुस्तरीय सौर वाष्पीकरण प्रणालियों का विकास आवश्यक है [26]। सामाजिक एवं आर्थिक विकास के साथ-साथ कच्चे तेल तथा माइक्रोप्लास्टिक द्वारा जल संसाधनों पर पड़ने वाले नकारात्मक प्रभाव भी स्पष्ट रूप से सामने आए हैं। इसलिए ऐसे टिकाऊ एवं बहुउद्देशीय अवशोषक पदार्थों का विकास अत्यंत आवश्यक है, जो विभिन्न प्रकार के प्रदूषकों को प्रभावी ढंग से हटाने में सक्षम हों। **रितोंग वांग** एवं उनके सहयोगियों ने पॉलीडाइमिथाइलसिलोक्सेन (PDMS) तथा स्टियरिक अम्ल-संशोधित TiO_2 नैनोकणों का उपयोग करते हुए डिप-कोटिंग तकनीक द्वारा एक बहुक्रियात्मक सुपरहाइड्रोफोबिक त्रि-आयामी पॉलीयूरीथेन स्पंज (PSTS) विकसित किया। यह स्पंज प्रकाश एवं ऊष्मा की उपस्थिति में उच्च श्यानता वाले कच्चे तेल को प्रभावी रूप से हटाने के साथ-साथ तेल-जल इमल्शन पृथक्करण, जल आधारित कार्बनिक प्रदूषकों को हटाने तथा माइक्रोप्लास्टिक निष्कासन में भी अत्यंत प्रभावी पाया गया [27]।

जुओझू यिन एवं सहयोगियों ने एक सरल घोल-आधारित विसर्जन तकनीक द्वारा बहुक्रियात्मक सेल्यूलोज-आधारित झिल्ली (CBM) विकसित की, जिसमें 163° का जल संपर्क कोण (Water Contact Angle) प्राप्त हुआ। इस झिल्ली में स्व-सफाई (Self-Cleaning), तेल-जल पृथक्करण, जैव-अवरोधन प्रतिरोध (Anti-Biofouling) तथा प्रकाश-उत्प्रेरक अपघटन (Photocatalytic Degradation) जैसी उत्कृष्ट विशेषताएँ पाई गईं। CuO नैनोस्ट्रक्चर कोटिंग तथा स्टियरिक अम्ल संशोधन के संयोजन से 96% पृथक्करण दक्षता, 141 $Lm^{-2}h^{-1}$ फ्लक्स तथा सात बार पुनः उपयोग की क्षमता प्राप्त हुई [28]। इसी प्रकार, विकसित सेल्यूलोज झिल्ली ने $167.2 \pm 2°$ के उच्च स्थिर जल संपर्क कोण के साथ उत्कृष्ट सुपरहाइड्रोफोबिक एवं स्व-सफाई गुण प्रदर्शित किए [29]। इसके अतिरिक्त, **जुओझू यिन** एवं **शियाओशियांग चेन** ने स्क्रैप-कोटिंग तथा डिप-कोटिंग विधियों के संयोजन द्वारा सुपरहाइड्रोफोबिक, प्रकाश-उत्प्रेरक एवं स्व-सफाई गुणों वाली NBSS सामग्री विकसित की। इसमें नैनोसेल्यूलोज सतह पर ग्राफीन परत लगाकर चालक चैनल बनाए गए तथा MnO_2/स्टियरिक अम्ल मिश्रण द्वारा सुपरहाइड्रोफोबिसिटी

उत्पन्न की गई। विकसित सतह ने जल एवं कार्बनिक प्रदूषकों के प्रति उत्कृष्ट स्व-सफाई प्रदर्शन प्रदर्शित किया [30]।

केशिकीय बल द्वारा संचालित द्रव प्रवाह (Capillary-Driven Liquid Flow) अनेक प्राकृतिक प्रणालियों में प्रमुख परिवहन तंत्र है। यह पृथ्वी पर वृक्षों की अधिकतम ऊँचाई को निर्धारित करता है [31] तथा मानव मस्तिष्क में रक्त प्रवाह के नियमन में भी योगदान देता है [32]। इसके अतिरिक्त, जलाशय चट्टानों से तेल निष्कर्षण तथा भूमिगत जल स्रोतों में अमिश्रणीय प्रदूषकों के प्रसार जैसी प्रक्रियाओं में भी केशिकीय प्रवाह महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है [33]। सूक्ष्म एवं नैनो प्रणालियों में केशिकीय प्रभावों की स्पष्ट समझ माइक्रो/नैनो इलेक्ट्रोमैकेनिकल प्रणालियों (MEMS एवं NEMS) के उन्नत डिज़ाइन के लिए अत्यंत आवश्यक है [34]। केशिका नलिकाएँ (Capillary Tubes) विभिन्न अनुप्रयोगों में द्रव के सटीक नियंत्रण के लिए महत्वपूर्ण होती हैं। इनका उपयोग शीतलन एवं वातानुकूलन प्रणालियों में रेफ्रिजरेंट प्रवाह नियंत्रण, केशिका वैद्युतकण संचलन (Capillary Electrophoresis), क्रोमैटोग्राफी, चिकित्सा निदान में रक्त नमूना संग्रहण एवं ग्लूकोज़ मापन, माइक्रोफ्लुइडिक उपकरणों, इंकजेट प्रिंटरों तथा प्रयोगशाला उपकरणों में किया जाता है [35]। केशिकीय उत्थान (Capillary Rise) का समीकरण द्रव के भार तथा पृष्ठ तनाव द्वारा उत्पन्न ऊपर की ओर लगने वाले बल के संतुलन से प्राप्त किया जाता है। किसी द्रव बूंद का संपर्क कोण (θ) तीन अंतरापृष्ठीय पृष्ठ तनावों के परस्पर संतुलन द्वारा निर्धारित होता है, जिसके परिणामस्वरूप त्रि-संपर्क रेखा (Triple Line) पर शुद्ध बल शून्य हो जाता है। संपर्क कोण के आधार पर विभिन्न सामग्रियों का वर्गीकरण किया जाता है, जैसा कि चित्र 1 में दर्शाया गया है।



चित्र 1: किसी लिक्विड ड्रॉपलेट का कॉन्टैक्ट एंगल (θ) तीन इंटरफेशियल सरफेस टेंशन वैल्यू से प्रभावित होता है, जो मिलकर ट्रिपल लाइन पर ज़ीरो नेट फ़ोर्स बनाती हैं। कॉन्टैक्ट एंगल के आधार पर मटीरियल अलग-अलग तरह के होते हैं, जैसा कि ऊपर दिए गए चित्र में दिखाया गया है

1.2. पृष्ठभूमि (Background)

हाइड्रोफोबिसिटी (Hydrophobicity) वह प्रवृत्ति है जिसमें अध्रुवीय (Non-polar) समूह या अणु जल में एकत्रित हो जाते हैं, क्योंकि वे ध्रुवीय जल अणुओं के संपर्क से बचने का प्रयास करते हैं। यह व्यवहार जल और हाइड्रोकार्बनों के बीच प्रतिकर्षण के कारण नहीं, बल्कि जल अणुओं पर हाइड्रोकार्बन-सदृश समूहों के प्रभाव के कारण उत्पन्न होता है [36]। "हाइड्रोफोबिसिटी" शब्द उन अणुओं के गुण को दर्शाता है जो जल के संपर्क से बचते हैं। ऐसे अणुओं को **हाइड्रोफोब (Hydrophobes)** कहा जाता है। यह शब्द ग्रीक भाषा के शब्दों *Hydro* (जल), *Philicity* (पसंद) तथा *Phobicity* (नापसंद) से मिलकर बना है। वैज्ञानिक समुदाय में सामान्यतः यह स्वीकार किया जाता है कि कोई सतह तब **हाइड्रोफोबिक (Hydrophobic)** कहलाती है जब उसका स्थिर जल संपर्क कोण (Static Water Contact Angle, θ) **90° या उससे अधिक (θ ≥ 90°)** हो तथा **हाइड्रोफिलिक (Hydrophilic)** तब कहलाती है जब

θ ≤ 90° हो। हालांकि, इस बात का स्पष्ट वैज्ञानिक औचित्य कम उपलब्ध है कि केवल 2° के परिवर्तन (89° से 91°) पर कोई सतह हाइड्रोफिलिक से हाइड्रोफोबिक कैसे हो जाती है [37]। ZnO (जिंक ऑक्साइड) की सतह जल के साथ उसकी अंतरापृष्ठीय (Interfacial) भौतिक एवं रासायनिक अंतःक्रियाओं के आधार पर हाइड्रोफोबिक अथवा हाइड्रोफिलिक दोनों प्रकार का व्यवहार प्रदर्शित कर सकती है। ZnO का उपयोग सुपरहाइड्रोफोबिक सतहों के निर्माण में किया जाता है। उदाहरण के लिए, स्टील सब्सट्रेट पर Zn कोटिंग द्वारा लगभग **158° जल संपर्क कोण (Water Contact Angle, WCA)** तथा लगभग **6° स्लाइडिंग कोण (Sliding Angle)** वाली सुपरहाइड्रोफोबिक सतह तैयार की गई है [38]। इसी प्रकार, बोरोसिलिकेट काँच, अमोर्फस क्वार्ट्ज, एकल-क्रिस्टलीय सैफायर, लैन्थेनम एल्युमिनेट तथा यट्रियम-स्थिरित जिरकोनिया जैसे सब्सट्रेटों पर तापीय वाष्पीकरण (Thermal Evaporation) तकनीक द्वारा ZnO हाइड्रोफोबिक कोटिंग तैयार की गई, जो यांत्रिक एवं ऑक्सीकरण प्रतिरोधी अनुप्रयोगों के लिए भी उपयुक्त पाई गई [39]।

सुपरहाइड्रोफोबिक सतहें, जैसे कीटों के पंख, जल-चालक कीट (Water Strider) के पैर, कमल की पत्तियाँ तथा शार्क की त्वचा, जल को प्रतिकर्षित करके तथा बूंदों के निर्माण को प्रोत्साहित करके द्रव-गैस अंतरापृष्ठ (Liquid-Gas Interface) का निर्माण करती हैं। इस प्रकार की सतहें सीमित ज्यामितीय संरचनाओं (Confined Geometries) में वाष्प अथवा गैस को फँसाकर प्रकृति की एक अद्भुत अनुकूलन क्षमता को प्रदर्शित करती हैं [40]।

किसी पदार्थ की सतह पर उपस्थित अणुओं के बंधनों की संख्या कम होने के कारण अतिरिक्त ऊर्जा उत्पन्न होती है, जिसे **पृष्ठ तनाव (Surface Tension, γ)** कहा जाता है। अंतरापृष्ठ पर उत्पन्न यह पृष्ठ तनाव तीन प्रकार का होता है—

1. **द्रव-गैस अंतरापृष्ठ (Liquid-Gas Interface)** : γ_{LG}
2. **द्रव-ठोस अंतरापृष्ठ (Liquid-Solid Interface)** : γ_{LS}
3. **ठोस-गैस अंतरापृष्ठ (Solid-Gas Interface)** : γ_{SG}

इन तीनों पृष्ठ तनावों की भूमिका किसी बूंद के संतुलन आकार (Equilibrium Shape) को निर्धारित करने में अत्यंत महत्वपूर्ण होती है। किसी ठोस सतह पर स्थित द्रव बूंद द्वारा निर्मित संपर्क कोण (Contact Angle) सीधे तौर पर इन तीनों पृष्ठ तनाव मानों से प्रभावित होता है।

जैसा कि चित्र 2(b) में दर्शाया गया है, संतुलन अवस्था में उस **त्रि-संपर्क रेखा (Triple Line)** पर, जहाँ तीनों बल मिलते हैं, परिणामी बल शून्य होता है। अतः,

$$\gamma_{LG} \cos\theta = \gamma_{SG} - \gamma_{LS} \qquad (1)$$

Here, $\theta = cos^{-1}\left(\frac{\gamma_{SG}-\gamma_{LS}}{\gamma_{LG}}\right)$

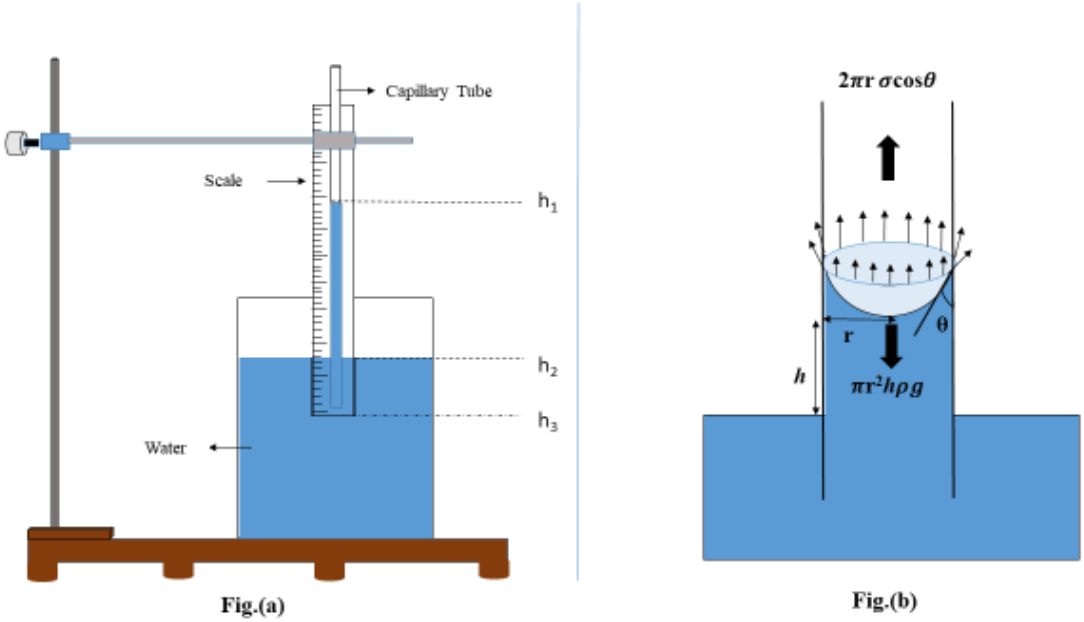
इस समीकरण को पारंपरिक रूप से **यंग का नियम (Young's Law)** कहा जाता है। यह नियम द्रव बूंद के व्यवहार को **हाइड्रोफिलिक (θ < 90°)** अथवा **हाइड्रोफोबिक (θ > 90°)** के रूप में वर्गीकृत करता है, जहाँ θ संतुलन संपर्क कोण को दर्शाता है [41]। सतह के गुणों में परिवर्तन करने के लिए विभिन्न रासायनिक पदार्थों द्वारा सतह को कोट करना भी एक सामान्य एवं प्रभावी तकनीक है। कई बार केवल एक **स्व-संयोजित एकल आणविक परत (Self-Assembled Monolayer, SAM)** ही सतह के गुणों को पूर्णतः परिवर्तित करने के लिए पर्याप्त होती है [42]। इस प्रकार, उपयुक्त रासायनिक संशोधन एवं नैनोकण कोटिंग द्वारा सतह की आर्द्रणीयता (Wettability), हाइड्रोफोबिसिटी तथा अन्य कार्यात्मक गुणों को नियंत्रित एवं अनुकूलित किया जा सकता है।

1.3 केशिकीय परिघटना का परिचय (Introduction to Capillary Phenomenon)

केशिका नलिका (Capillary Tube), जिसकी लंबाई सामान्यतः 1 से 6 सेमी तथा आंतरिक व्यास 0.5 से 2 मिमी के बीच होता है, आसंजन (Adhesion), संसंजन (Cohesion) तथा पृष्ठ तनाव (Surface Tension) बलों की परस्पर क्रिया के आधार पर कार्य करती है [43,44]। जब द्रव एवं केशिका नलिका की दीवारों के बीच का आसंजक बल, द्रव अणुओं के मध्य संसंजक बल से अधिक होता है, तब द्रव नलिका में ऊपर की ओर उठता है तथा अवतल मेनिस्कस (Concave Meniscus) बनाता है, जिसमें संपर्क कोण (Contact Angle) 90° से कम होता है [45]। इसके विपरीत, यदि द्रव अणुओं के बीच संसंजक बल अधिक प्रबल हो, तो द्रव नीचे की ओर दब जाता है और उत्तल मेनिस्कस (Convex Meniscus) का निर्माण होता है, जिसमें संपर्क कोण 90° से अधिक होता है।

केशिकीय उत्थान (Capillary Rise) एक जटिल परिघटना है, जो द्रव के गुणों तथा केशिका नलिका की सतही विशेषताओं पर निर्भर करती है। जब केशिका नलिका की आंतरिक सतह पर ZnO (जिंक ऑक्साइड) नैनोकणों की कोटिंग की जाती है, तो सतह की आकृति (Morphology), खुरदरापन (Roughness) तथा द्रव–ठोस अंतःक्रियाओं में परिवर्तन होता है, जिससे केशिकीय व्यवहार में महत्वपूर्ण बदलाव आ सकता है। उत्पन्न केशिकीय उत्थान केवल प्रत्यक्ष आर्द्रणीयता (Apparent Wettability) पर ही निर्भर नहीं करता, बल्कि नैनोकणों के वितरण, सतही विषमता (Surface Heterogeneity) तथा सीमित ज्यामिति (Confined Geometry) के भीतर प्रभावी आर्द्रण परिस्थितियों पर भी निर्भर करता है। यह प्रभाव द्रव के ध्रुवीय गुणों तथा ZnO नैनोकणों की सतही ऊर्जा के कारण उत्पन्न होता है [46]। इसके अतिरिक्त, तापमान में वृद्धि से द्रव की श्यानता (Viscosity) कम हो जाती है तथा पृष्ठ तनाव में परिवर्तन होता है, जिसके परिणामस्वरूप केशिकीय उत्थान प्रभावित होता है [47]। द्रव का प्रकार भी केशिकीय उत्थान को निर्धारित करने में महत्वपूर्ण भूमिका

निभाता है। सामान्यतः अधिक पृष्ठ तनाव तथा कम श्यानता वाले द्रवों में केशिकीय उत्थान अधिक देखा जाता है [48]। चित्र 2 में दर्शाए अनुसार, यदि त्रिज्या **r** वाली एक केशिका नलिका को घनत्व **ρ** वाले द्रव से भरे पात्र में डुबोया जाए, तो नलिका में **h** ऊँचाई तक उठे द्रव स्तंभ का भार, द्रव के पृष्ठ तनाव के ऊर्ध्वाधर घटक द्वारा संतुलित होता है।



चित्र 2 (a) केशिका क्रिया (capillary action) का चित्रण, (b) बल संतुलन से केशिका में द्रव का ऊपर चढ़ना (capillary rise)

पृष्ठ तनाव के कारण लगने वाला ऊर्ध्वाधर बल

अर्थात,

$$F_V = \sigma \cos\theta \times 2\pi r$$

जहाँ,

- F_V= पृष्ठ तनाव के कारण उत्पन्न ऊर्ध्वाधर बल
- σ= द्रव का पृष्ठ तनाव (Surface Tension)
- θ= संपर्क कोण (Contact Angle)
- r= केशिका नलिका की त्रिज्या (Radius of Capillary Tube)
- $2\pi r$= केशिका की परिधि, अर्थात वह कुल लंबाई जिस पर पृष्ठ तनाव कार्य करता है

इसके अतिरिक्त,

द्रव स्तंभ का भार = द्रव का आयतन × घनत्व × गुरुत्वीय त्वरण (2)

$$W = \pi r 2 h \rho g$$

संतुलन (Equilibrium) की अवस्था में, समीकरण (1) तथा समीकरण (2) द्वारा दिए गए बल परस्पर बराबर होने चाहिए।

$$F_V = W \qquad (3)$$

$$2\pi r\sigma\cos\theta = \pi r^2 h\rho g$$

इससे हमें प्राप्त होता है:

$$h = \frac{2\sigma\cos\theta}{r\rho g} \qquad (4)$$

यह समीकरण केशिकीय उत्थान की ऊँचाई को व्यक्त करता है, जिसे **ज्यूरिन का नियम (Jurin's Law)** कहा जाता है।

1.4 केशिका नलिका के भीतर ZnO नैनोकणों (हाइड्रोफोबिक) की सतही कोटिंग के प्रभाव

जिंक ऑक्साइड (ZnO) नैनोकण अपनी जैव-सुरक्षित (Bio-safe) एवं जैव-संगत (Biocompatible) प्रकृति के कारण सेंसर एवं ट्रांसड्यूसर अनुप्रयोगों में अत्यधिक महत्वपूर्ण हैं। इनका उपयोग कैपेसिटर, सुरक्षात्मक कोटिंग, फोटो प्रिंटिंग, सौर सेल, इलेक्ट्रोफोटोग्राफी, ब्लू लेजर डायोड तथा LCD में चालक पतली परतों (Conductive Thin Films) के निर्माण में किया जाता है [49]। हाइड्रोफोबिक ZnO नैनोस्ट्रक्चर की आकृति (Morphology) जल संपर्क कोण को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करती है, जहाँ सतह का खुरदरापन (Surface Roughness) हाइड्रोफोबिसिटी निर्धारित करने में प्रमुख भूमिका निभाता है [50]। अधिक सतह क्षेत्रफल एवं जटिल आकृति वाली संरचनाएँ, जैसे नैनोशीथ (Nanosheaves), अधिक हाइड्रोफोबिक व्यवहार प्रदर्शित करती हैं तथा उच्च जल संपर्क कोण उत्पन्न करती हैं। उदाहरणस्वरूप, ZnO नैनोरॉड लगभग 157° का संपर्क कोण प्रदर्शित कर सुपरहाइड्रोफोबिक व्यवहार दिखाते हैं, जबकि ZnO नैनोकण लगभग 67° संपर्क कोण के साथ हाइड्रोफिलिक व्यवहार प्रदर्शित कर सकते हैं [51]। A.M. Munshi एवं सहयोगियों ने पाया कि जब ZnO नैनोकणों का आकार 14 nm से बढ़कर 620 nm हुआ, तब जल का संपर्क कोण 24° से बढ़कर 67° हो गया। इससे स्पष्ट होता है कि संपर्क कोण नैनोकणों के आकार पर अत्यधिक निर्भर करता है तथा कण आकार बढ़ने के साथ बढ़ता है [52]। ZnO नैनोकण उत्कृष्ट ऊष्मा प्रतिरोध, कम इलेक्ट्रॉन चालकता, जीवाणुरोधी (Antibacterial) तथा संक्षारण-प्रतिरोधी (Anti-corrosion) गुणों से युक्त होते हैं। केशिका नलिका की आंतरिक सतह पर ZnO नैनोकणों की कोटिंग उसकी हाइड्रोफोबिक विशेषताओं को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करती है, जिसके प्रमुख प्रभाव निम्नलिखित हैं—

(i) जल संपर्क कोण में वृद्धि

ZnO नैनोकण सतह के जल संपर्क कोण को बढ़ाते हैं, जिससे सतह अधिक हाइड्रोफोबिक हो जाती है।

(ii) दाब-पतन (Pressure Drop) में वृद्धि

हाइड्रोफोबिक सतह द्रव प्रवाह के दौरान अतिरिक्त प्रतिरोध उत्पन्न कर सकती है, जिससे नलिका में दाब-पतन बढ़ सकता है।

(iii) जल प्रतिकर्षण क्षमता में सुधार

नैनोसंरचित सतह जल के प्रवेश तथा प्रवाह को कम करती है, जिससे जल-विकर्षण (Water Repellency) में वृद्धि होती है।

(iv) प्रवाह दर में कमी

हाइड्रोफोबिक कोटिंग के कारण जलीय विलयनों का प्रवाह कम हो सकता है, जिससे केशिका नलिका में द्रव की प्रवाह दर घट जाती है।

1.5 हाइड्रोफोबिक प्रभाव एवं अंतःक्रिया (Hydrophobic Effect and Interaction)

हाइड्रोफोबिक प्रभाव वह परिघटना है जिसमें अध्रुवीय अणु या सतहें जल के संपर्क से बचती हैं, जिसके परिणामस्वरूप प्रणाली की मुक्त ऊर्जा (Free Energy) कम हो जाती है। इस प्रभाव के कारण अध्रुवीय अणु जल के साथ संपर्क को न्यूनतम रखते हुए अन्य अध्रुवीय अणुओं या सतहों के साथ अंतःक्रिया करना पसंद करते हैं। हाइड्रोफोबिक अंतःक्रियाएँ (Hydrophobic Interactions) इसी प्रभाव से संबंधित हैं और जल में डूबे हुए हाइड्रोफोबिक अणुओं एवं सतहों के बीच अत्यंत प्रबल आकर्षण उत्पन्न करती हैं। यह आकर्षण कई बार निर्वात (Vacuum) में उपस्थित आकर्षण से भी अधिक होता है। उदाहरण के लिए, मुक्त अंतरिक्ष में दो मीथेन अणुओं के बीच वैन डर वाल्स (Van der Waals) अंतःक्रिया ऊर्जा लगभग 2.5×10^{-21}J होती है, जबकि जलीय माध्यम में यह बढ़कर लगभग 14×10^{-21}J हो जाती है। अधिकांश संतृप्त हाइड्रोकार्बनों का पृष्ठ तनाव सामान्यतः 15–30 mJ m^{-2} के बीच होता है, जबकि जल के साथ उनका अंतरापृष्ठीय तनाव 40–50 mJ m^{-2}तक पाया जाता है। जल में इस प्रकार की प्रबल अंतःक्रिया को पारंपरिक वैन डर वाल्स सिद्धांत द्वारा पूर्णतः नहीं समझाया जा सकता, क्योंकि वह जलीय माध्यम में कम आकर्षण की भविष्यवाणी करता है। प्रारंभ में इस अत्यधिक आकर्षण के कारण "हाइड्रोफोबिक बंध (Hydrophobic Bond)" की अवधारणा प्रस्तावित की गई थी। किन्तु वर्तमान में यह स्पष्ट है कि यह प्रभाव मुख्यतः **एंट्रॉपी-नियंत्रित (Entropy-Driven)** प्रक्रिया है। जब दो हाइड्रोफोबिक इकाइयाँ एक-दूसरे के निकट आती हैं, तब उनके चारों ओर उपस्थित जल अणुओं के हाइड्रोजन बंधों की संरचना पुनर्गठित होती है। इस पुनर्संगठन के परिणामस्वरूप प्रणाली की एंट्रॉपी बढ़ती है तथा मुक्त ऊर्जा घटती है, जिससे दोनों हाइड्रोफोबिक इकाइयों के बीच प्रभावी आकर्षण उत्पन्न होता है। यही कारण है कि हाइड्रोफोबिक अंतःक्रियाएँ सामान्य रासायनिक बंधों की अपेक्षा अधिक दूरी तक प्रभावी रह सकती हैं।

2.0 कार्यविधि (Methodology)

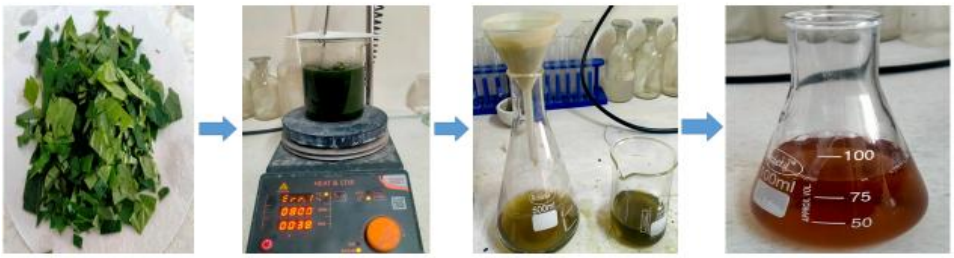
2.1 सामग्री एवं विधि (Material and Method)

इस अध्ययन में निम्नलिखित सामग्री एवं रसायनों का उपयोग किया गया: 16, 24 तथा 32 mg सांद्रता वाले जिंक ऑक्साइड (ZnO), जिन्हें 20 mL जल में घोला गया; 98% शुद्धता वाला जिंक एसीटेट डाइहाइड्रेट, व्हाटमैन फिल्टर पेपर, आसुत जल (Distilled Water) तथा 2 mL एथेनॉल। डहलिया (Dahlia) की पत्तियाँ उत्तर प्रदेश के गोरखपुर स्थित

Madan Mohan Malaviya University of Technology परिसर से एकत्रित की गई। प्रयोग में प्रयुक्त सभी रसायन विश्लेषणात्मक अनुसंधान (Analytical Research Grade) गुणवत्ता के थे तथा उनका कोई अतिरिक्त शोधन नहीं किया गया। ZnO नैनोकणों के संश्लेषण हेतु सोल-जेल (Sol-Gel) विधि का उपयोग किया गया।

2.2 पत्ती निष्कर्ष (Leaf Extract) की तैयारी

डहलिया की पत्तियाँ आसपास के क्षेत्र से एकत्रित की गईं। धूल एवं अन्य अशुद्धियों को हटाने के लिए पत्तियों को आसुत जल से 2–3 बार धोकर सुखाया गया। इसके बाद पत्तियों को छोटे-छोटे टुकड़ों में काटा गया तथा मूसल एवं ओखली (Mortar and Pestle) की सहायता से उनका पेस्ट तैयार किया गया। अतिरिक्त नमी हटाने के लिए पत्तियों को सामान्य कमरे के तापमान पर सुखाया गया। इसके पश्चात पत्तियों को बारीक टुकड़ों में काटकर 100 mL आसुत जल में मिलाया गया तथा मिश्रण को 60°C तापमान एवं 800 rpm की गति पर 3 घंटे तक चुंबकीय स्टिरर (Magnetic Stirrer) पर चलाया गया। कमरे के तापमान (लगभग 30°C) पर पीले रंग का निष्कर्ष (Extract) प्राप्त हुआ। प्राप्त निष्कर्ष को चित्र 3 में दर्शाए अनुसार व्हाटमैन फिल्टर पेपर द्वारा छान लिया गया।



चित्र 3: पत्ती के अर्क की तैयारी (यह चित्र संदर्भ 51 के डाटा को उपयोग कर दुबारा से बनाया गया है)

2.3 डहलिया पत्ती निष्कर्ष-संवेष्टित (Capped) ZnO नैनोकणों का संश्लेषण

इस विधि में 3.3 g जिंक एसीटेट डाइहाइड्रेट को 50 mL आसुत जल में घोलकर बीकर में रखा गया। इस विलयन को 50°C तापमान पर 50 rpm की गति से 30 मिनट तक चुंबकीय रूप से हिलाया गया। इसके बाद 20 mL पत्ती निष्कर्ष को ब्युरेट की सहायता से धीरे-धीरे समांगी विलयन में मिलाया गया। तत्पश्चात चुंबकीय स्टिरर का तापमान 80°C तथा गति 100 rpm निर्धारित की गई और विलयन को 80°C पर 2 घंटे तक लगातार हिलाया गया। इस प्रक्रिया के दौरान 0.3 M सोडियम हाइड्रॉक्साइड (NaOH) विलयन को बूंद-बूंद करके तब तक मिलाया गया जब तक pH मान 8 न हो गया। परिणामस्वरूप सफेद रंग का जिलेटिनस अवक्षेप (Gelatinous Precipitate) प्राप्त हुआ। इस अवक्षेप को 80°C तापमान एवं 100 rpm की गति पर 1 घंटे तक निरंतर हिलाया गया। मिश्रण के पूर्णतः अभिक्रियाशील होने के पश्चात सफेद पेस्ट को व्हाटमैन फिल्टर पेपर द्वारा पृथक किया गया। इस पेस्ट को पेट्री डिश में स्थानांतरित करके 100°C तापमान पर 2 घंटे तक ओवन में गर्म किया गया। प्राप्त अवक्षेप को कई बार आसुत जल से धोया गया। समय की बचत के लिए अवक्षेप को 2 घंटे तक माइक्रोवेव ओवन में सुखाया गया। अंततः सूखे नमूने को मूसल एवं ओखली द्वारा पीसकर ZnO नैनोकणों का महीन सफेद पाउडर प्राप्त किया गया, जिसका उपयोग आगे के अध्ययन में किया गया।

3. परिणाम एवं चर्चा (Results and Discussion)

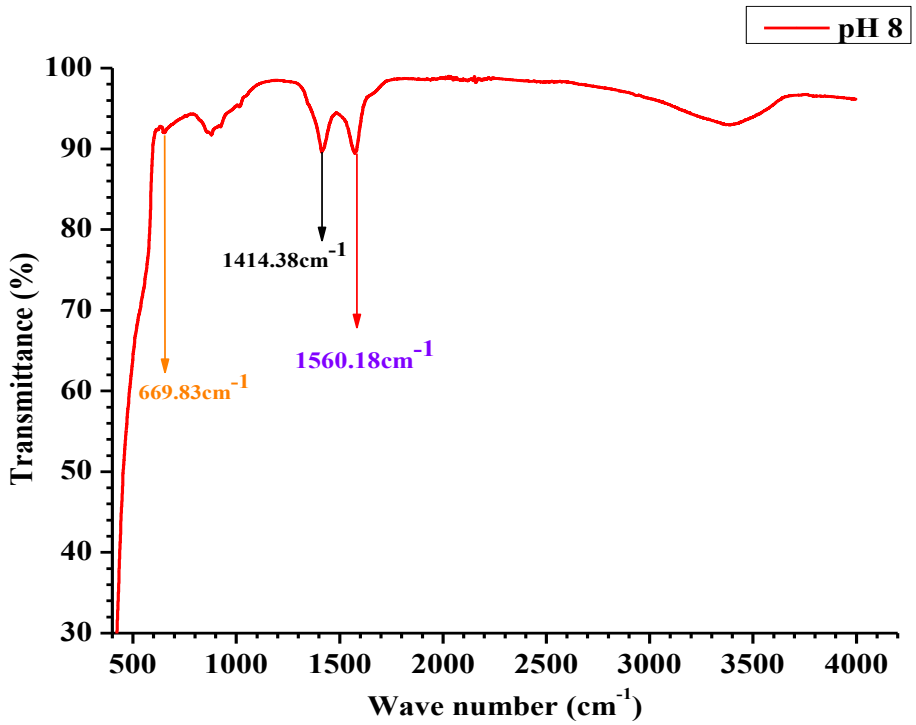
नमूनों का विश्लेषण **फोरियर ट्रांसफॉर्म अवरक्त स्पेक्ट्रोस्कोपी (FTIR)**, **पराबैंगनी-दृश्य-निकट अवरक्त स्पेक्ट्रोस्कोपी (UV–Vis–NIR)**, **एक्स-किरण विवर्तन (XRD)** तथा **स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM)** तकनीकों द्वारा किया गया। FTIR तकनीक का उपयोग कार्बनिक, बहुलकीय (Polymeric) तथा अकार्बनिक पदार्थों की पहचान के लिए किया जाता है। UV–Vis–NIR तकनीक पदार्थों के प्रकाशीय अवशोषण (Optical Absorption) एवं संचरण (Transmission) गुणों का अध्ययन करती है, जिससे उनके बैंड गैप तथा दोषों एवं अशुद्धियों की उपस्थिति संबंधी महत्वपूर्ण जानकारी प्राप्त होती है।

XRD तकनीक का उपयोग पदार्थों की संरचना, संघटन एवं भौतिक गुणों के अध्ययन हेतु किया जाता है, जबकि SEM तकनीक वस्तुओं के आकार एवं सतही संरचना की उच्च विभेदन (High Resolution) वाली छवियाँ प्रदान करती है तथा रासायनिक संरचना में स्थानिक परिवर्तनों का विश्लेषण करने में सहायक होती है। इसके अतिरिक्त, फ्लोरेसेंस स्पेक्ट्रोस्कोपी (Fluorescence Spectroscopy) का उपयोग अणुओं एवं नैनोकणों के फ्लोरेसेंस गुणों को समझने के लिए किया गया। धातु एवं धातु-ऑक्साइड नैनोकण सतही प्लाज़्मोन अनुनाद (Surface Plasmon Resonance) के कारण विशिष्ट फ्लोरेसेंस प्रदर्शित करते हैं, जिसमें उच्च ऊर्जा वाले आवेशित वाहक (Charged Carriers) सामूहिक रूप से दोलन करते हैं। यह तकनीक नैनोकणों के प्रकाशीय एवं इलेक्ट्रॉनिक गुणों के विश्लेषण में महत्वपूर्ण भूमिका निभाती है।

3.1 FTIR विश्लेषण (FTIR Analysis)

चित्र 4 में प्रदर्शित FTIR विश्लेषण से नमूने में उपस्थित विभिन्न क्रियात्मक समूहों (Functional Groups) के विशिष्ट कंपन मोड (Vibrational Modes) से संबंधित विशेष शिखर (Characteristic Peaks) प्राप्त हुए। ये शिखर तथा उनसे संबंधित तरंगसंख्या (Wavenumber) नमूने की रासायनिक संरचना एवं आणविक विन्यास के संबंध में महत्वपूर्ण जानकारी प्रदान करते हैं। ग्राफ में ट्रांसमिटेंस (%) एवं तरंगसंख्या (cm^{-1}) के मध्य संबंध प्रदर्शित किया गया है, जहाँ प्रत्येक शिखर विशिष्ट तरंगसंख्या पर नमूने द्वारा अवरक्त विकिरण (Infrared Radiation) के अवशोषण को दर्शाता है। 669.83 cm^{-1} पर प्राप्त शिखर ZnO नैनोकणों में उपस्थित Zn–O बंध के स्ट्रेचिंग कंपन (Stretching Vibration) के कारण उत्पन्न हुआ है। यह ZnO नैनोकणों की एक विशिष्ट पहचान है तथा FTIR स्पेक्ट्रम में सामान्यतः देखा जाता है। 1414.38 cm^{-1} पर प्राप्त शिखर C–C स्ट्रेचिंग कंपन को दर्शाता है, जो नमूने में कार्बन-कार्बन बंधों की उपस्थिति का संकेत देता है। यह शिखर कार्बन परमाणुओं की खिंचाव गति (Stretching Motion) को प्रदर्शित करता है। 1560.18 cm^{-1} पर प्राप्त शिखर C=O तथा O–H दोनों प्रकार के स्ट्रेचिंग कंपन से संबंधित है। यह शिखर नमूने में कार्बोनिल (C=O) एवं हाइड्रॉक्सिल (OH) क्रियात्मक समूहों की उपस्थिति को दर्शाता है तथा क्रमशः C=O द्विबंध एवं OH समूह की कंपन गति का प्रतिनिधित्व करता है।

ग्राफ में विभिन्न शिखरों की तीव्रता नमूने से गुजरने वाले अवरक्त विकिरण की ट्रांसमिटेंस (%) को प्रदर्शित करती है। ये शिखर पदार्थ में उपस्थित विशिष्ट क्रियात्मक समूहों के फिंगरप्रिंट (Fingerprint) के रूप में कार्य करते हैं, जिससे शोधकर्ताओं को नमूने के रासायनिक घटकों की पहचान एवं विश्लेषण करने में सहायता मिलती है।

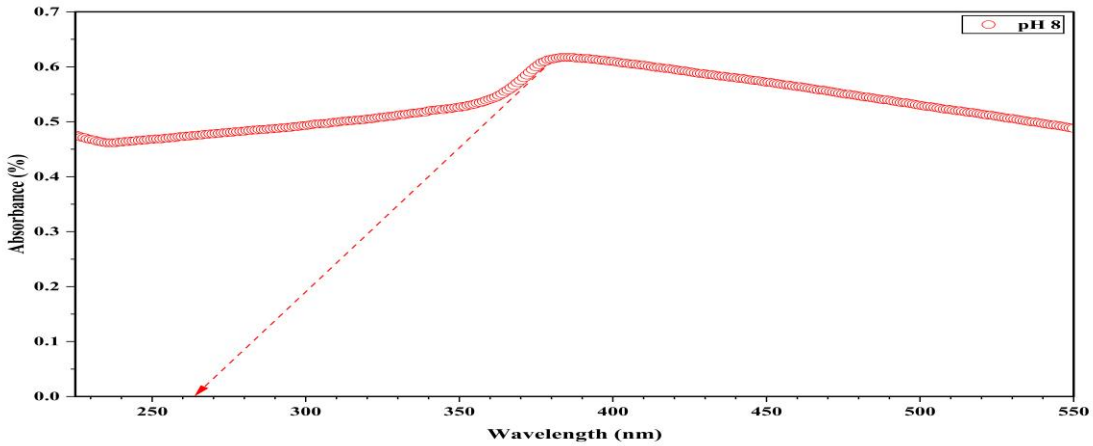


चित्र 4: ट्रांसमिटेंस और वेवलेंथ के बीच FTIR विश्लेषण का ग्राफ़ (यह चित्र संदर्भ 51 के डाटा को उपयोग कर दुबारा से बनाया गया है)

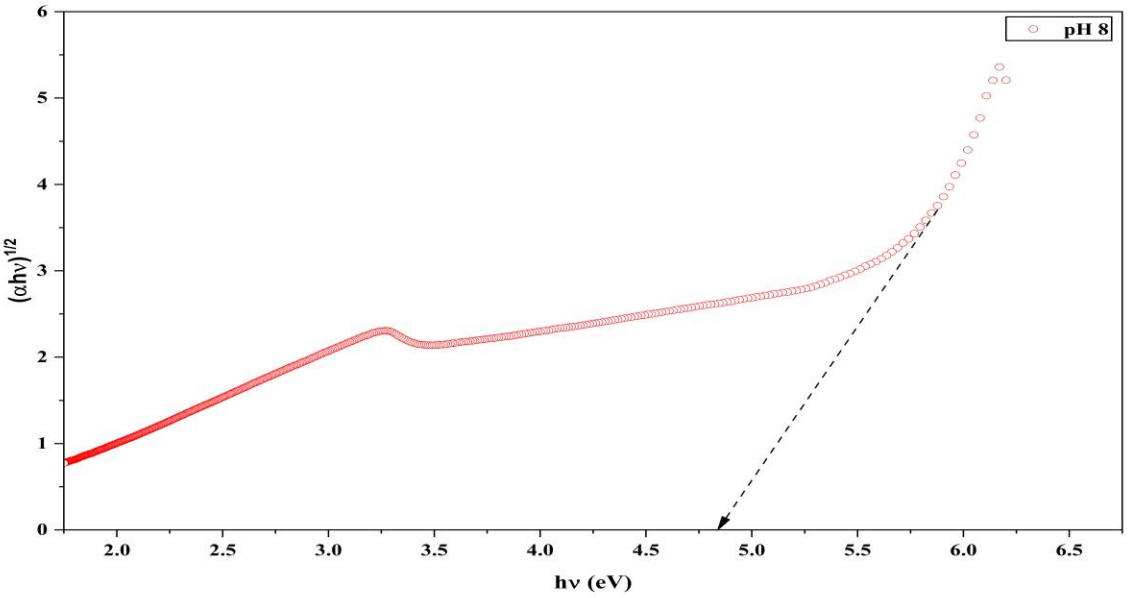
3.2 UV–Vis–NIR विश्लेषण (UV–Vis–NIR Analysis) और Tauc Plot

ZnO नैनोकणों के प्रकाशीय गुणों का अध्ययन करने हेतु pH 8 पर UV–Vis–NIR और टॉक प्लाट विश्लेषण किया गया, जैसा कि चित्र 5 और 6 में दर्शाया गया है। mZnO नैनोकणों का UV–Vis अवशोषण स्पेक्ट्रम, जो pH 8 पर संश्लेषित किए गए थे, पराबैंगनी (Ultraviolet) क्षेत्र में एक स्पष्ट अवशोषण विशेषता प्रदर्शित करता है। अवशोषण किनारा (Absorption Edge) लगभग 265–270 nm पर देखा गया, जो लगभग 4.67 eV की प्रत्यक्ष प्रकाशीय संक्रमण ऊर्जा (Apparent Optical Transition Energy) के अनुरूप है। इसी प्रकार, टॉक प्लॉट (Tauc Plot) विश्लेषण से लगभग 4.85 eV की प्रकाशीय संक्रमण ऊर्जा प्राप्त हुई। यह ध्यान देना महत्वपूर्ण है कि ये मान बल्क ZnO (Bulk ZnO) के अंतर्निहित बैंडगैप से काफी अधिक हैं, जिसका मान सामान्यतः 3.2–3.4 eV के बीच रिपोर्ट किया जाता है। अतः प्राप्त मानों को बल्क ZnO के मूलभूत बैंडगैप (Fundamental Bandgap) के रूप में नहीं माना जाना चाहिए। इसके बजाय, ये मान नैनो-स्तरीय प्रभावों, सतह-संबंधित इलेक्ट्रॉनिक अवस्थाओं, दोष-प्रेरित (Defect-Induced) इलेक्ट्रॉनिक संरचना परिवर्तनों तथा संश्लेषण के दौरान प्रयुक्त डहलिया पत्ती निष्कर्ष (Dahlia Leaf Extract) से उत्पन्न फाइटोकेमिकल कैपिंग एजेंटों के प्रभाव के कारण उत्पन्न उच्च-ऊर्जा प्रकाशीय संक्रमणों का प्रतिनिधित्व कर सकते हैं। इसके अतिरिक्त, नैनो-आकार के कारण उत्पन्न Quantum Confinement Effect, जिसके परिणामस्वरूप इलेक्ट्रॉनिक ऊर्जा स्तरों में परिवर्तन संभव होता है। नैनो-आकार के क्रिस्टलाइट्स (Crystallites) तथा सतही क्रियात्मककरण (Surface Functionalization) ZnO नैनोकणों के इलेक्ट्रॉनिक परिवेश को परिवर्तित कर सकते हैं, जिसके परिणामस्वरूप अवशोषण विशेषता छोटी तरंगदैर्ध्य (Shorter Wavelength) की ओर स्थानांतरित होती हुई प्रतीत होती है। इस प्रकार की ब्लू-शिफ्टेड (Blue-Shifted) प्रकाशीय प्रतिक्रियाएँ नैनो-संरचित अर्धचालक (Semiconductor) प्रणालियों में पूर्व में भी रिपोर्ट की गई हैं, जहाँ सतही अवस्थाएँ, जालक (Lattice) की अपूर्णताएँ तथा कण-आकार से संबंधित प्रभाव प्रकाशीय अवशोषण गुणों को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करते हैं।

बैंड गैप वह न्यूनतम ऊर्जा है जो इलेक्ट्रॉनों को संयोजक बैंड (Valence Band) से चालकता बैंड (Conduction Band) में उत्तेजित करने के लिए आवश्यक होती है, जिसके परिणामस्वरूप संबंधित तरंगदैर्ध्य के फोटॉनों का अवशोषण होता है। UV विश्लेषण से यह भी स्पष्ट हुआ कि pH मान ZnO नैनोकणों के प्रकाशीय गुणों को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करता है, जिससे विभिन्न तरंगदैर्ध्यों पर ऊर्जा बैंड गैप एवं अवशोषण व्यवहार में परिवर्तन होता है। ZnO की इलेक्ट्रॉनिक संरचना की समझ ऑप्टोइलेक्ट्रॉनिक उपकरणों तथा प्रकाश-उत्प्रेरण (Photocatalysis) अनुप्रयोगों में इसके उपयोग को बेहतर बनाने के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण है। प्रकाश-उत्प्रेरण का मूल सिद्धांत यह है कि किसी विशिष्ट तरंगदैर्ध्य के प्रकाश द्वारा उत्तेजित होने पर इलेक्ट्रॉन-होल युग्म (Electron-Hole Pairs) उत्पन्न होते हैं, जो उत्प्रेरक की सतह पर विभिन्न ऑक्सीकरण-अपचयन (Redox) अभिक्रियाओं को संपन्न करते हैं। ZnO एक अर्धचालक ऑक्साइड है, जिसकी प्रत्यक्ष बैंड गैप चौड़ाई लगभग **3.37 eV**, उत्तेजन बंधन ऊर्जा (Excitation Binding Energy) लगभग **60 meV** तथा कमरे के तापमान पर गहरे बैंगनी/सीमांत पराबैंगनी (Deep Violet/UV) अवशोषण गुण पाए जाते हैं [53]। यह TiO_2 के समान उत्कृष्ट विद्युत, यांत्रिक एवं प्रकाशीय गुणों वाला अर्धचालक ऑक्साइड है [54]। इसके अतिरिक्त ZnO में एंटीफाउलिंग (Antifouling) एवं जीवाणुरोधी (Antibacterial) गुण भी पाए जाते हैं तथा यह उत्कृष्ट प्रकाश-उत्प्रेरक सक्रियता प्रदर्शित करता है। यह सर्वविदित है कि किसी पदार्थ की आकृति (Morphology), सतह क्षेत्रफल (Surface Area) एवं क्रिस्टलीयता (Crystallinity) उसकी प्रकाश-उत्प्रेरक दक्षता को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करते हैं [55]। अतः 4.67–4.85 eV के रिपोर्ट किए गए मानों को बल्क ZnO के अंतर्निहित बैंडगैप के बजाय संश्लेषित नैनो-संरचित प्रणाली से संबंधित प्रत्यक्ष प्रकाशीय संक्रमण ऊर्जाओं (Apparent Optical Transition Energies) के रूप में व्याख्यायित किया जाना चाहिए।



चित्र 5: अवशोषण और तरंगदैर्ध्य के बीच UV विश्लेषण ग्राफ़ (यह चित्र संदर्भ 51 के डाटा को उपयोग कर दुबारा से बनाया गया है)



चित्र 6: इनडायरेक्ट ट्रांज़िशन के लिए ZnO नैनोपार्टिकल्स का टॉस प्लॉट (Tauc plot) (यह चित्र संदर्भ 51 के डाटा को उपयोग कर दुबारा से बनाया गया है)

3.3 XRD विश्लेषण (X-Ray Diffraction Analysis)

XRD विश्लेषण द्वारा प्राप्त विवर्तन पैटर्न (Diffraction Pattern) नमूने के क्रिस्टलोग्राफिक गुणों को प्रदर्शित करते हैं, जैसा कि चित्र 5 में दिखाया गया है। ZnO नैनोकणों के औसत क्रिस्टलीय आकार (Crystallite Size) का निर्धारण **Scherrer समीकरण** द्वारा किया गया:

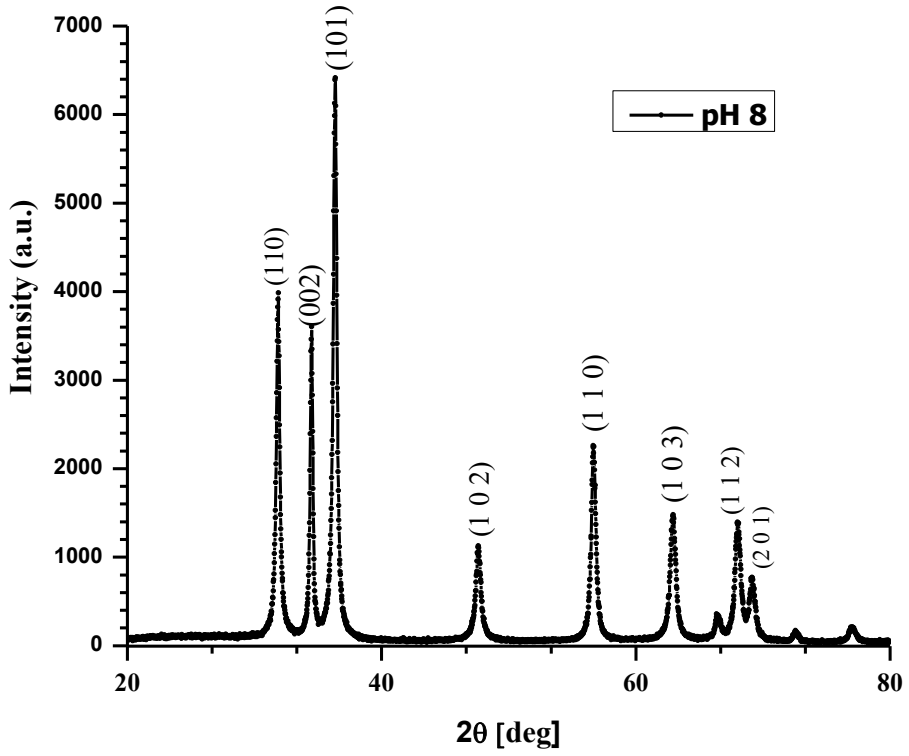
$$D = K\lambda\beta\cos\theta$$

जहाँ,

- **D** = औसत क्रिस्टलीय डोमेन आकार (Average Crystallite Size)
- **K** = Scherrer स्थिरांक (≈ 0.9)
- **λ** = X-किरण की तरंगदैर्ध्य
- **β** = विवर्तन शिखर का पूर्ण अर्ध-अधिकतम चौड़ाई (FWHM)
- **θ** = विवर्तन कोण (Diffraction Angle)

XRD विश्लेषण को Scherrer समीकरण के साथ संयोजित करने से क्रिस्टलीय डोमेन आकार में होने वाले परिवर्तनों का अध्ययन संभव हुआ। यह विधि केशिकीय प्रभावों को नियंत्रित करने वाले नैनोस्तरीय तंत्रों को समझने में महत्वपूर्ण जानकारी प्रदान करती है तथा नैनोकण कोटिंग के प्रभावों की व्याख्या में सहायक होती है। चित्र 7 के XRD ग्राफ से विभिन्न विवर्तन कोणों (2θ) पर विभिन्न क्रिस्टलीय तल (Planes) प्राप्त हुए। 31.84°, 34.59°, 36.34°, 47.55°, 56.63°, 62.97° तथा 68.10° पर प्राप्त शिखर क्रमशः (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) एवं (201) क्रिस्टलीय तलों से संबंधित हैं। XRD परिणामों से ZnO नैनोकणों का क्रिस्टलीय आकार **15.47 nm से 34.72 nm** के मध्य पाया गया, जबकि औसत क्रिस्टलीय आकार **23.59 nm** प्राप्त हुआ। यह परिणाम दर्शाते हैं कि संश्लेषित ZnO नैनोकण नैनोमीटर स्तर की उच्च क्रिस्टलीय संरचना रखते हैं, जो उनके प्रकाशीय, यांत्रिक एवं केशिकीय गुणों को प्रभावित करने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाती है।

2θ(degree)	FWHM (डिग्री)	D-स्पेसिंग	क्रिस्टलाइट का आकार (nm)
31.84	0.326	16.047	27.32
34.59	0.251	29.344	34.72
36.34	0.335	41.788	26.33
47.55	0.470	49.794	19.54
56.63	0.420	44.780	22.48
62.97	0.537	48.395	15.47
68.10	0.521	52.097	19.30

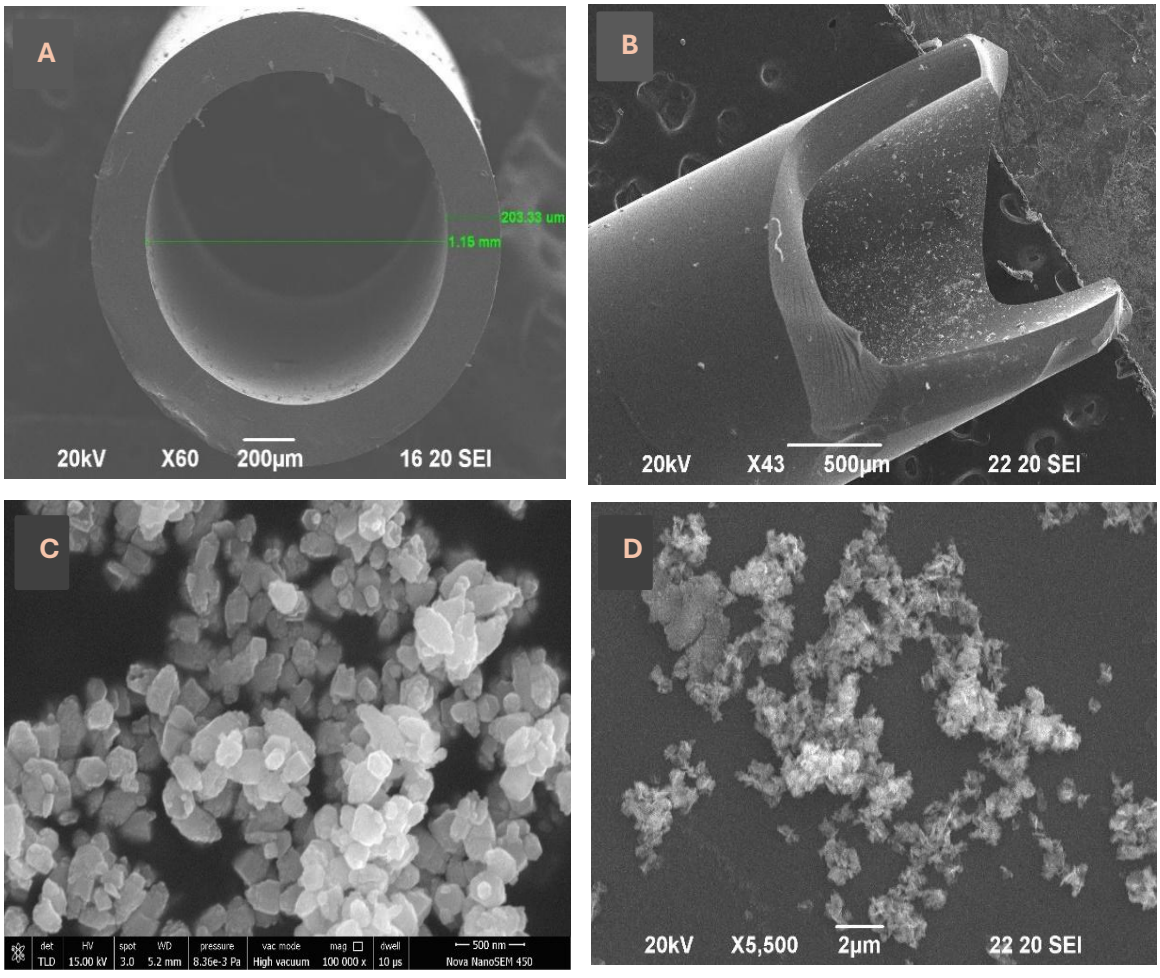


चित्र 7: तीव्रता और 2θ के बीच XRD विश्लेषण (यह चित्र संदर्भ 51 के डाटा को उपयोग कर दुबारा से बनाया गया है)

3.4 FESEM विश्लेषण (FESEM Analysis)

फील्ड एमिशन स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (FESEM) का उपयोग केशिका नलिका (Capillary Tube) की आंतरिक सतह पर लेपित नैनोकणों की आकृति एवं संरचना का अध्ययन करने के लिए किया गया। उच्च-विभेदन (High Resolution) SEM चित्रण द्वारा नैनोकणों के वितरण, कोटिंग की एकरूपता तथा सतही खुरदरापन (Surface Roughness) से संबंधित महत्वपूर्ण जानकारी प्राप्त हुई, जिससे इन पदार्थों की भौतिक विशेषताओं को बेहतर ढंग से समझा जा सका [56]। FESEM विश्लेषण का सिद्धांत इस शोध कार्य में विशेष महत्व रखता है, क्योंकि यह नैनोस्तर पर उत्पन्न संरचनात्मक परिवर्तनों का प्रत्यक्ष दृश्य प्रस्तुत करता है तथा नैनोकण कोटिंग के केशिकीय प्रभाव (Capillarity) पर पड़ने वाले प्रभावों को समझने में सहायता करता है। FESEM का उपयोग ZnO नैनोकणों की आकृति (Shape) एवं सतही संरचना

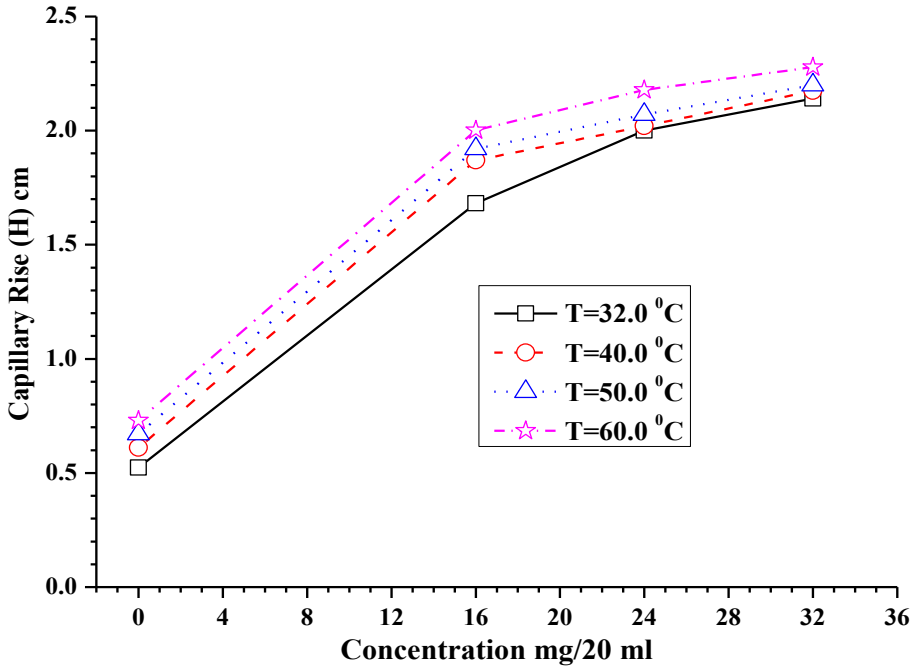
(Surface Morphology) के निर्धारण हेतु किया गया। विश्लेषण से ज्ञात हुआ कि संश्लेषित ZnO नैनोकण शुद्ध षट्कोणीय वुर्ट्ज़ाइट (Hexagonal Wurtzite) संरचना के रूप में संगठित (Agglomerated) थे। FESEM चित्रों को केशिकीय व्यवहार के साथ सहसंबद्ध करने पर यह समझा जा सकता है कि नैनोकण कोटिंग सतह की आकृति एवं छिद्र संरचना (Pore Structure) को किस प्रकार परिवर्तित करती है, जिससे सतह की आर्द्रणीयता (Wettability) एवं द्रव परिवहन गुण प्रभावित होते हैं। चित्र 8(A) में 60X आवर्धन पर यह स्पष्ट रूप से देखा जा सकता है कि ZnO नैनोकण केशिका की आंतरिक सतह से चिपके हुए हैं। इसके अतिरिक्त, आंतरिक व्यास लगभग **1.15 mm** तथा केशिका की दीवार की मोटाई लगभग **203.33 µm** प्राप्त हुई। चित्र 8(B) में टूटी हुई केशिका नलिका के भीतर ZnO नैनोकणों का वितरण निम्न आवर्धन पर देखा जा सकता है, जबकि चित्र 8(C) में लगभग **10000X** आवर्धन पर 500 nm के पैमाने के साथ प्रत्येक नैनोकण का आकार लगभग **100 nm** दिखाई देता है। चित्र 8(D) में लगभग **5500X** आवर्धन पर यह देखा गया कि ZnO नैनोकण आपस में जुड़कर समूह (Clusters) बनाते हैं तथा उनके मध्य औसत दूरी लगभग **2 µm** है। ZnO नैनोकणों का यह **असमान (Non-uniform) वितरण** तथा **समूह निर्माण (Clustering)** इंगित करता है कि लेपित केशिका सतह को एक आदर्श समांगी (Homogeneous) हाइड्रोफोबिक सतह नहीं माना जा सकता। इस प्रकार की विषम (Heterogeneous) सतही संरचनाएँ स्थानीय आर्द्रण मार्ग (Localized Wetting Pathways) तथा सतही ऊर्जा में भिन्नता उत्पन्न कर सकती हैं, जो प्रेक्षित केशिकीय व्यवहार को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करती हैं। FESEM चित्रों में ZnO नैनोकणों का वितरण पूर्णतः समरूप नहीं है, बल्कि वे अनेक स्थानों पर समूह (Clusters) बनाते हुए दिखाई देते हैं। इस प्रकार की विषम सतह स्थानीय रूप से सतही ऊर्जा (Local Surface Energy) में परिवर्तन उत्पन्न करती है।



चित्र 8 FESEM विश्लेषण (A) 200µm पर (B) 500µm पर (C) 500nm पर (D) 2µm पर (यह चित्र संदर्भ 51 के डाटा को उपयोग कर दुबारा से बनाया गया है)

3.5 (केशिकीय उत्थान का अध्ययन) Investigation of Capillary Rise

इस कार्य में हमने डहलिया पत्ती के निष्कर्ष (Dahlia Leaf Extract) का उपयोग करके ZnO नैनोकणों का संश्लेषण किया। नैनोकणों की शुद्धता एवं क्रिस्टलीयता का मूल्यांकन करने के लिए FTIR, फ्लोरेसेंस, रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी तथा UV स्पेक्ट्रोस्कोपी का उपयोग किया गया। FTIR रासायनिक बंधों की पहचान कर नैनोकणों के प्रकार एवं शुद्धता का निर्धारण करता है, जबकि UV स्पेक्ट्रोस्कोपी यौगिकों की संरचनात्मक विशेषताओं का अध्ययन करती है। रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी कंपन मोड (Vibration Modes) तथा निम्न-आवृत्ति मोड की पहचान करती है। फ्लोरेसेंस स्पेक्ट्रोस्कोपी का उपयोग रासायनिक संघटन के विश्लेषण के लिए किया गया। ये सभी तकनीकें ZnO नैनोकणों के गुणों एवं संरचना के बारे में महत्वपूर्ण जानकारी प्रदान करती हैं। चित्र 8(a) बीकर में आसुत जल के स्तर तथा विभिन्न सांद्रताओं (16 mg, 24 mg, 32 mg) एवं बिना सांद्रता वाले केशिका में आसुत जल के उत्थान के मध्य संबंध को 32°C, 40°C, 50°C तथा 60°C तापमान पर प्रदर्शित करता है [तालिका 1]।



चित्र 9 (a) अलग-अलग तापमान पर डिस्टिल्ड वॉटर के साथ कंसंट्रेशन बनाम कैपिलरी राइज़

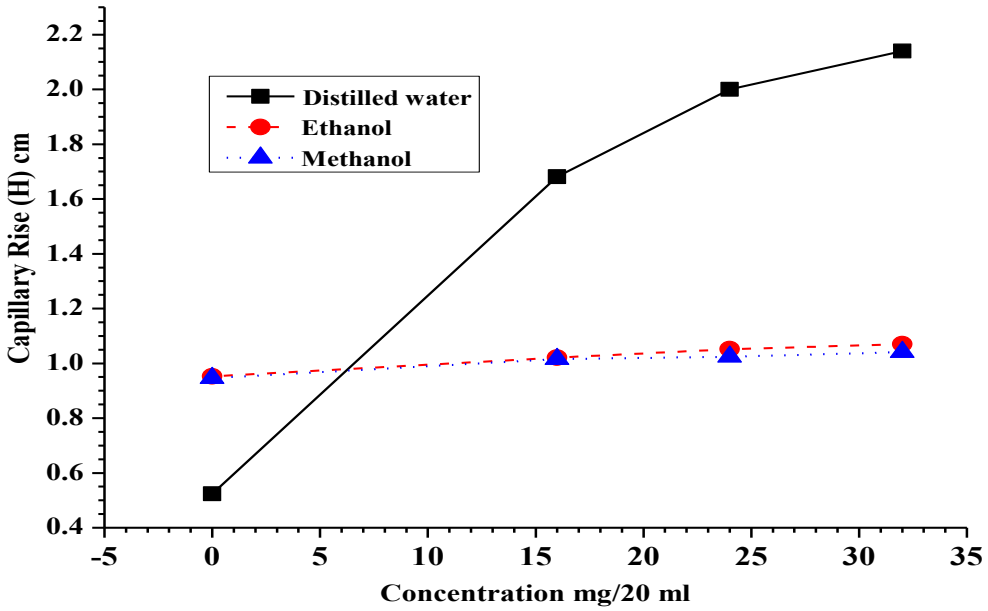
केशिकीय उत्थान एक संकीर्ण नलिका में द्रव का ऊपर की ओर उठना है, जो पृष्ठ तनाव तथा ठोस-द्रव अंतरापृष्ठ पर कार्य करने वाले आसंजक बलों की परस्पर क्रिया के कारण होता है। यह पृष्ठ तनाव, संपर्क कोण, द्रव घनत्व तथा केशिका त्रिज्या जैसे मापदंडों पर निर्भर करता है। बिना लेपित केशिका में उत्थान मुख्य रूप से नलिका पदार्थ की अंतर्निहित आर्द्रणीयता तथा द्रव के गुणों द्वारा नियंत्रित होता है।

वर्तमान अध्ययन में, यद्यपि ZnO नैनोकण हाइड्रोफोबिक व्यवहार (संपर्क कोण > 90°) प्रदर्शित करते हैं, फिर भी केशिका की आंतरिक सतह पर इनके समावेशन से केशिकीय उत्थान में उल्लेखनीय वृद्धि हुई। आदर्श रूप से, हाइड्रोफोबिक सतहों को आसंजक अंतःक्रिया को कम करके केशिकीय उत्थान को घटाना चाहिए (क्योंकि $\cos\theta$ का मान घटता है)। किंतु इस स्थिति में नैनो-संरचित ZnO कोटिंग ने केवल आर्द्रणीयता ही नहीं, बल्कि अन्य सतही गुणों को भी परिवर्तित कर दिया। SEM में देखी गई फूलगोभी-सदृश (Cauliflower-like) संरचना अत्यधिक खुरदरी एवं छिद्रयुक्त थी। यह खुरदरापन अनेक परस्पर जुड़े हुए नैनो-केशिका चैनल बनाता है, जो प्रभावी स्थानीय केशिका त्रिज्या को कम कर देते हैं तथा केशिकीय दाब को बढ़ाते हैं। केशिकीय सिद्धांत के अनुसार, प्रभावी त्रिज्या में कमी उत्थान ऊँचाई में वृद्धि का कारण बनती है। इसके अतिरिक्त, हरित संश्लेषण के दौरान बचे हुए फाइटोकेमिकल्स स्थानीय हाइड्रोफिलिक क्रियात्मक समूह प्रदान कर सकते हैं, जो ZnO की हाइड्रोफोबिक प्रकृति की आंशिक भरपाई करते हैं तथा जल के आसंजन को बढ़ाते हैं। तापमान भी केशिकीय उत्थान में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। तापमान बढ़ने पर जल की श्यानता (Viscosity) कम हो जाती है, जिससे वह केशिका में अधिक आसानी से प्रवाहित हो पाता है और उत्थान बढ़ जाता है। यद्यपि

तापमान बढ़ने पर पृष्ठ तनाव में हल्की कमी आती है, फिर भी इस प्रणाली में श्यानता में कमी का प्रभाव अधिक प्रमुख रहता है, जिसके परिणामस्वरूप कुल केशिकीय ऊँचाई में वृद्धि होती है। अतः ZnO-लेपित केशिकाओं में प्राप्त बढ़ा हुआ केशिकीय उत्थान नैनो-स्तरीय खुरदरापन, प्रभावी त्रिज्या में कमी, विषम आर्द्रणीयता तथा तापमान-निर्भर द्रव गुणों के संयुक्त प्रभाव का परिणाम है।

जैसे-जैसे आसुत जल का तापमान बढ़ा, केशिका में जल की मात्रा भी बढ़ती गई। तापमान बढ़ने के साथ केशिकीय उत्थान में वृद्धि का कारण पृष्ठ तनाव में होने वाली कमी थी। आगे बढ़ते हुए, हमने तीन सांद्रता अनुपातों 16 mg/20 ml, 24 mg/20 ml तथा 32 mg/20 ml का अध्ययन किया। इन सांद्रताओं में जिंक ऑक्साइड सम्मिलित था तथा प्रत्येक को 20 ml आसुत जल एवं 98% शुद्धता वाले डिहाइड्रेटेड एसीटेट में घोला गया। केशिका की आंतरिक सतह पर ZnO नैनोकणों की कोटिंग के कारण बीकर में उपस्थित आसुत जल का स्तर अचानक बढ़ गया। हमने पाया कि जैसे-जैसे सांद्रता बढ़ी, केशिका में जल का उत्थान तीव्रता से बढ़ता गया। चूँकि नैनोकण केशिका की आंतरिक सतह पर समरूप रूप से लेपित नहीं थे, जैसा कि चित्र 7 में दिखाया गया है, वे यादृच्छिक रूप से वितरित थे और इसी कारण इस प्रकार का केशिकीय उत्थान देखा गया। 32°C तापमान पर बिना किसी सांद्रता के केशिकीय उत्थान 0.524 cm था। जबकि 16 mg, 24 mg तथा 32 mg सांद्रता पर 32°C तापमान में केशिकीय उत्थान क्रमशः 1.681 cm, 2.00 cm तथा 2.2 cm तक पहुँच गया। 32 mg सांद्रता पर प्राप्त केशिकीय उत्थान की तुलना 16 mg तथा 24 mg सांद्रताओं से करने पर ग्राफ में हल्की वृद्धि दिखाई दी, जो दर्शाती है कि 32 mg सांद्रता पर आसंजक बल 16 mg तथा 24 mg की तुलना में अधिक था। इस प्रकार अधिकतम केशिकीय उत्थान 32 mg सांद्रता पर प्राप्त हुआ। चित्र 8(a) से यह भी स्पष्ट है कि तापमान बढ़ने पर केशिकीय उत्थान भी बढ़ता है। यद्यपि तापमान बढ़ने के साथ पृष्ठ तनाव (Surface Tension) में भी हल्की कमी आती है, किन्तु इस अध्ययन में श्यानता में कमी का प्रभाव अधिक प्रमुख पाया गया। इसलिए Jurin के नियम के साथ-साथ द्रव के गतिशील गुणों (Dynamic Fluid Properties) को भी ध्यान में रखते हुए परिणामों की व्याख्या की गई है।

चित्र 8(b) बीकर में उपस्थित आसुत जल, मेथेनॉल तथा एथेनॉल के स्तर एवं 32°C तापमान पर केशिका में मेथेनॉल के उत्थान के मध्य संबंध को दर्शाता है [तालिका 1, 2, 3]। मेथेनॉल के लिए बिना सांद्रता के औसत केशिकीय उत्थान 0.946 cm पाया गया, जबकि 16 mg, 24 mg तथा 32 mg सांद्रता पर यह क्रमशः 1.016 cm, 1.024 cm तथा 1.041 cm था। इसी प्रकार एथेनॉल के लिए बिना सांद्रता के औसत केशिकीय उत्थान 0.952 cm पाया गया, जबकि 16 mg, 24 mg तथा 32 mg सांद्रता पर यह क्रमशः 1.021 cm, 1.052 cm तथा 1.070 cm था। ग्राफ से निष्कर्ष निकलता है कि तापमान बढ़ने पर आसुत जल के लिए केशिकीय उत्थान तीव्रता से बढ़ता है, जबकि मेथेनॉल एवं एथेनॉल के लिए यह वृद्धि अपेक्षाकृत धीमी होती है।



चित्र 9 (b) डिस्टिल्ड वॉटर, इथेनॉल और मेथनॉल के साथ सांद्रता बनाम केशिका-उन्नयन (capillary rise)

ZnO नैनोकण-लेपित केशिकाओं में मेथेनॉल एवं एथेनॉल का केशिकीय उत्थान नैनोकणों की मात्रा बढ़ने (0 mg < 16 mg < 24 mg < 32 mg) के साथ मध्यम किंतु निरंतर वृद्धि प्रदर्शित करता है। बिना लेपित केशिकाओं में मेथेनॉल (~0.96 cm) तथा एथेनॉल (~0.955 cm) का उत्थान उनके अपेक्षाकृत कम पृष्ठ तनाव के कारण नियंत्रित होता है, जिससे केशिकीय बल भी अपेक्षाकृत कम उत्पन्न होते हैं। किंतु ZnO कोटिंग के बाद दोनों द्रवों का उत्थान थोड़ा बढ़ गया और 32 mg लोडिंग पर क्रमशः ~1.041 cm (मेथेनॉल) तथा ~1.070 cm (एथेनॉल) तक पहुँच गया। यद्यपि ZnO नैनोकण स्वभावतः हाइड्रोफोबिक हैं, उनकी नैनो-संरचित फूलगोभी-सदृश आकृति सतही खुरदरापन उत्पन्न करती है तथा परस्पर जुड़े हुए नैनो-स्तरीय केशिका मार्ग बनाती है। ये संरचनाएँ प्रभावी स्थानीय केशिका त्रिज्या को कम करती हैं तथा केशिकीय दाब को बढ़ाती हैं, जिससे द्रव उत्थान में वृद्धि होती है। मेथेनॉल एवं एथेनॉल की सतही तनाव कम तथा आर्द्रणीयता अधिक होने के कारण वे नैनो-संरचित कोटिंग में अधिक आसानी से प्रवेश कर पाते हैं, जिससे द्रव परिवहन बेहतर होता है। इसके अतिरिक्त, ध्रुवीय अल्कोहल अणुओं तथा ZnO सतह पर उपस्थित अवशिष्ट क्रियात्मक समूहों (जो पौधा-आधारित संश्लेषण से उत्पन्न हुए) के मध्य हाइड्रोजन बंधन जैसी अंतःआणविक क्रियाएँ भी आसंजन को बढ़ाती हैं। ZnO लोडिंग बढ़ने के साथ उत्थान में होने वाली क्रमिक वृद्धि यह पुष्टि करती है कि सतही खुरदरापन, छिद्रयुक्तता तथा नैनो-केशिका निर्माण ZnO की अंतर्निहित हाइड्रोफोबिसिटी पर हावी हैं। तथापि, यह वृद्धि जल की तुलना में कम स्पष्ट है क्योंकि अल्कोहलों का पृष्ठ तनाव स्वाभाविक रूप से कम होता है।

तालिका 1: डिस्टिल्ड वॉटर में नैनोपार्टिकल्स की अलग-अलग सांद्रता (concentration) पर कैपिलरी राइज़ (capillary rise) के व्यवहार की तुलना:

तरल	एकाग्रता /20 ml	अलग-अलग तापमान पर बीकर में तरल का स्तर (Y1) cm				अलग-अलग तापमान पर केशिका (कैपिलरी) में द्रव का स्तर (Y2) cm				केशिका-उन्नयन ($h= Y_2-Y_1$) cm			
		32^0 C	**40^0 C**	**50^0 C**	**60^0 C**	**32^0 C**	**40^0 C**	**50^0 C**	**60^0 C**	**32^0 C**	**40^0 C**	**50^0 C**	**60^0 C**
आसुत जल	0 Mg	1.351	1.255	1.245	1.240	1.875	1.865	1.916	1.970	0.524	0.61	0.671	0..730
	16 Mg	1.351	1.255	1.245	1.240	3.032	3.125	3.165	3.241	1.681	1.870	1.92	2.001
	24 Mg	1.351	1.255	1.245	1.240	3.351	3.275	3.315	3.418	2.000	2.02	2.070	2.178
	32 Mg	1.351	1.255	1.245	1.240	3.557	3.395	3.420	3.518	2.140	2.175	2.200	2.278

तालिका 2. मेथनॉल सॉल्यूशन में अलग-अलग नैनोपार्टिकल कंसंट्रेशन पर कैपिलरी राइज़ व्यवहार की तुलना:

क्र. सं.	एकाग्रता	32°C पर बीकर में मेथनॉल का स्तर (Y1) cm	32°C पर कैपिलरी (Y2) में मेथनॉल का स्तर (cm में)	केशिका-उन्नयन = (Y_2-Y_1) cm at 32^0C
1.	0	3.463	4.398	0.96
		3.463	4.401	0.93
		3.463	4.410	0.95
2.	16mg	3.400	4.416	1.016
3.	24mg	3.400	4.424	1.024
4.	32mg	3.450	4.491	1.041

तालिका 3. इथेनॉल सॉल्यूशन में अलग-अलग नैनोपार्टिकल कंसंट्रेशन पर कैपिलरी राइज़ व्यवहार की तुलना।

क्र. सं.	एकाग्रता	32°C पर बीकर में इथेनॉल का स्तर (Y1) cm	32°C पर कैपिलरी (Y2) में इथेनॉल का स्तर (cm में)	Capillary rise = (Y_2-Y_1) cm at 32^0C
1.	0	4.100	5.055	0.955
		4.255	5.201	0.946
		4.245	5.197	0.956
2.	16mg	4.100	5.121	1.021
3.	24mg	4.100	5.052	1.052
4.	32mg	4.067	5.137	1.070

4. निष्कर्ष (Conclusion)

फ्लोरेसेंस स्पेक्ट्रोस्कोपी द्वारा लगभग 550 nm के आसपास संकीर्ण शिखर तरंगदैर्ध्य प्राप्त हुए, तथा UV विश्लेषण ने 4.889 eV से 5.33 eV के बीच बैंडगैप ऊर्जा की पुष्टि की। हाइड्रोफोबिक ZnO नैनोकणों के समावेशन से केशिकीयता (Capillarity) में उल्लेखनीय वृद्धि देखी गई, जिसे जल और नैनोकण-संशोधित सतह के बीच संपर्क कोण (Contact Angle) में सुधार से जोड़ा जा सकता है। संपर्क कोण मूल सतह के लगभग 60° से बढ़कर लगभग 120° हो गया, जो अधिक हाइड्रोफोबिक प्रकृति को दर्शाता है। इस बढ़ी हुई हाइड्रोफोबिसिटी ने अधिक स्थिर एवं सतत जल मेनिस्कस (Water Meniscus) के निर्माण में योगदान दिया, जिससे केशिकीय उत्थान को बढ़ावा मिला। केशिकीयता में यह वृद्धि जल तथा ZnO नैनोकण-संशोधित सतह के बीच मजबूत हाइड्रोफोबिक अंतःक्रियाओं से प्रत्यक्ष रूप से संबंधित है, जो यह संकेत देती है कि यह प्रणाली कोहरा-संग्रहण (Fog Harvesting) तथा जल-संग्रहण (Water Collection) जैसे अनुप्रयोगों के लिए एक संभावनाशील विकल्प हो सकती है। ये निष्कर्ष यह दर्शाते हैं कि उन्नत संरचनात्मक गुणों तथा विशिष्ट प्रकाशीय विशेषताओं वाले ZnO नैनोकण विभिन्न अनुप्रयोगों के लिए अत्यधिक संभावनाशील हैं। तथापि, नैनोकणों के पर्यावरणीय एवं स्वास्थ्य संबंधी प्रभावों को लेकर मौजूद चिंताओं को देखते हुए, उनके सुरक्षित उपयोग से संबंधित पहलुओं पर आगे और अनुसंधान किया जाना आवश्यक है। विशेष रूप से कृषि एवं खाद्य क्षेत्रों में इनके उपयोग के संदर्भ में यह सुनिश्चित करना अत्यंत महत्वपूर्ण है कि ये नैनो-पदार्थ वर्तमान पर्यावरणीय समस्याओं को और अधिक न बढ़ाएँ।

संदर्भ ग्रंथ सूची (Bibliography/References)

1. Panayiotis Kolliopoulos, Krystopher S. Jochem, Daniel Johnson, Wieslaw J. Suszynski, Lorraine F. Francis and Satish Kumar; Capillary-flow dynamics in open rectangular microchannels, J. Fluid Mech. (2021), vol. 911, A32, doi:10.1017/jfm.2020.986
2. Michael Berger, Nanotechnology: the future is Tiny, Royal Society of Chemistry, 2016.doi: https://doi.org/10.1039/9781782628873
3. Xiaojia He , Hua Deng , Huey-Min Hwang, "The current application of nanotechnology in food and agriculture." Journal of food and drug analysis, Vol. 27.1 (2019): 1-21. doi: https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.12.002
4. Shu Wang et al. "Application of nanotechnology in improving bioavailability and bioactivity of diet-derived phytochemicals." Journal of Nutritional Biochemistry 25 (2014) 363–376, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jnutbio.2013.10.002
5. Naseem, Taiba, and Tayyiba Durrani, "The role of some important metal oxide nanoparticles for wastewater and antibacterial applications: A review." Environmental Chemistry and Ecotoxicology 3 (2021): 59-75, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enceco.2020.12.001
6. Raghvendra Pratap Singh, Rahul Handa, and Geetanjali Manchanda, "Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity." Journal of controlled release 329 (2021): 1234-1248, doi: https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.051
7. Limin Guo et al. "Highly flexible cross-linked cellulose nanofibril sponge-like aerogels with improved mechanical property and enhanced flame retardancy." *Carbohydrate Polymers* 179 (2018): 333-340, doi: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.084
8. Amit Kumar et al. "Bio-inspired and biomaterials-based hybrid photocatalysts for environmental detoxification: A review." Chemical Engineering Journal 382 (2020): 122937, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122937
9. Ping-Chang Lin et al. "Techniques for physicochemical characterization of nanomaterials." Biotechnology advances 32.4 (2014): 711-726, doi: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.11.006
10. Chen-Kang Huang, Chih-Wei Lee, and Chung-Kai Wang, "Boiling enhancement by TiO2 nanoparticle deposition." International Journal of Heat and Mass Transfer 54.23-24 (2011): 4895-4903, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.07.001
11. Seyed Masoud Parsa et al. "A comprehensive study to find the optimal fraction of nanoparticle coated at the interface of solar desalination absorbers: 5E and GHGs analysis

in different seasons." Solar Energy Materials and Solar Cells 256 (2023): 112308, doi: https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112308
12. Mike Ojemaye, Omobola O. Okoh, and Anthony I. Okoh, "Surface modified magnetic nanoparticles as efficient adsorbents for heavy metal removal from wastewater: Progress and prospects." Materials Express 7.6 (2017): 439-456, doi: http://dx.doi.org/10.1166/mex.2017.1401
13. Feng, Juanjuan, et al. "Development of a cheap and accessible carbon fibers-in-poly (ether ether ketone) tube with high stability for online in-tube solid-phase microextraction." Talanta 148 (2016): 313-320, doi: https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.11.001
14. James Bell Munsie, F. Cameron. "The flow of liquids through capillary spaces." The Journal of Physical Chemistry 10.8 (2002): 658-674, doi: https://doi.org/10.1021%2fj150080a005
15. Wang, X., Hassan, A., Boudaoud, H. et al, A review on 3D printing of bioinspired hydrophobic materials: oil-water separation, water harvesting, and diverse applications, Adv Compos Hybrid Mater **6**, 170 (2023). https://doi.org/10.1007/s42114-023-00740-2
16. H. Zhang, Z. Guo; Biomimetic materials in oil/water separation: Focusing on switchable wettabilities and applications. Adv Colloid Interface Sci 2023;320: 103003, doi: https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103003
17. Liu Y, Lin Z, Luo Y, Wu R, Fang R, Umar A, et al. Superhydrophobic MOF based materials and their applications for oil-water separation. J Clean Prod 2023;420: 138347, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138347
18. Yang Y, Ren Z, Zhou C, Lin Y, Shi L, Hou L. Anisotropic superhydrophobic graphene aerogel with radial superelasticity and axial superstiffness for efficient on-demand oil–water separation. J Mater Chem A 2023;11(36):19524–35, doi: https://doi.org/10.1039/D3TA03859A
19. Li S-H, Li B-B, Zhao X-L, Wu H, Chai R-L, Li G-Y, et al. Macrocycle self-assembly hydrogel for high-efficient oil-water separation. Small 2023;19(40):2301934, doi: https://doi.org/10.1002/smll.202301934
20. Fu Y, Guo Z. Natural polysaccharide-based aerogels and their applications in oil–water separations: a review. J Mater Chem A 2022;10(15):8129–58, doi: https://doi.org/10.1039/D2TA00708H
21. Xiang B, Sun Q, Zhong Q, Mu P, Li J. Current research situation and future prospect of superwetting smart oil/water separation materials. J Mater Chem A 2022;10 (38):20190–217, doi: https://doi.org/10.1039/D2TA04469B
22. F. He, H. You, X. Liu, X. Shen, J. Zhang, Z. Wang, Interfacial-heating solar desalination of high-salinity brine: recent progress on salt management and water production, Chem. Eng. J. 470 (2023) 144332, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144332
23. L. Cui, P. Wang, H. Che, J. Chen, B. Liu, Y. Ao, Solar-driven interfacial water evaporation for wastewater purification: recent advances and challenges, Chem. Eng. J. 477 (2023) 147158, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147158
24. J. Wang, Y. Kong, Z. Liu, H. Wang, Solar-driven interfacial evaporation: design and application progress of structural evaporators and functional distillers, Nano Energy 108 (2023) 108115, doi: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.108115
25. X. Song, L. Jia, Z. Wei, T. Xiang, S. Zhou, Nature-inspired sustainable solar evaporators for seawater desalination, J. Mater. Chem. A 12 (2024) 613–633, doi: https://doi.org/10.1039/D3TA05941C
26. Guoyan Yang , Zuozhu Yin et al ; A typha orientalis-inspired 3D Janus solar evaporator with controllable wettability for highly efficient and stable solar desalination , Desalination 595 (2025) 118318 , doi: https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118318

27. Ritong Wang , Zuozhu Yin et al; Highly efficient multifunctional 3D polyurethane sponge with photothermal responsiveness for efficient oil-water separation and microplastic extraction, Desalination 601 (2025) 118604; doi: https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.118604
28. Zuozhu Yin, Feng Yuan et al ; A multifunctional and environmentally safe superhydrophobic membrane with superior oil/water separation, photocatalytic degradation and anti-biofouling performance , Journal of Colloid and Interface Science 611 (2022) 93-104 ; doi: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.12.070
29. Zuozhu Yin , Feng Yuan et al; Self-cleaning, underwater writable, heat-insulated and photocatalytic cellulose membrane for high-efficient oil/water separation and removal of hazardous organic pollutants ; Progress in Organic Coatings 157 (2021) 106311 , doi: https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106311
30. Zuozhu Yin, Xiaoxiang Chen et al.; Superhydrophobic Photocatalytic Self-Cleaning Nanocellulose-Based Strain Sensor for Full-Range Human Motion Monitoring, Adv. Mater. Interfaces 2023, 10, 2300350, doi: 10.1002/admi.202300350
31. Koch, G.W., et al.: The limits to tree height. Nature 428(6985), 851–854 (2004)
32. Mac Vicar, B.A., Salter, M.W.: Neuroscience: controlled capillaries. Nature 443(7112), 642–643 (2006), doi: https://doi.org/10.1038/443642a
33. Bear, J. (2013) Dynamics of Fluids in Porous Media. Courier Corporation, Chelmsford. https://doi.org/10.1097/00010694-197508000-00022
34. Pelesko, J.A., Bernstein, D.H.: Modeling Mems and Nems. CRC Press, Boca Raton (2002), doi: https://doi.org/10.1201/9781420035292
35. Fries, N., and M. Dreyer. "An analytic solution of capillary rise restrained by gravity." Journal of colloid and interface science 320.1 (2008): 259-263, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2008.01.009
36. Sara Gomez, Natalia Rojas-Valencia, Santiago A. Gomez, Chiara Cappelli, Gabriel Merino and Albeiro Restrepo "A molecular twist on hydrophobicity" Chem. Sci., 2021, 12, 9233, doi: https://doi.org/10.1039/D1SC02673A
37. Kock-Yee Law "Definitions for Hydrophilicity, Hydrophobicity, and Superhydrophobicity: Getting the Basics Right" The Journal of Physical Chemistry Letter, J. Phys. Chem. Lett. 2014, 5, 4, 686–688, doi: https://doi.org/10.1021/jz402762h
38. Li H.; Yu S.; Hu J.; Liu E. A Robust Superhydrophobic Zn Coating with ZnO Nanosheets on Steel Substrate and Its Self-Cleaning Property. *Thin Solid Films* 2018, 666, 100–107, doi: 10.1016/j.tsf.2018.09.019
39. Shaik U. P.; Purkayastha D. D.; Krishna M. G.; Madhurima V. Nanostructured Zn and ZnO Nanowire Thin Films for Mechanical and Self-Cleaning Applications. *Appl. Surf. Sci.* 2015, 330, 292–299, doi: 10.1016/j.apsusc.2015.01.027
40. Satya Pal Singh, Archana Kumari Singh ; Formation of trapped meta-stable liquid–vapour interfaces in polar liquids in presence of excess gas-like molecules: Anomalous heat capacities and emergence of microscopic bubbles, Results in Physics, Volume 50, id.106554, doi: 10.1016/j.rinp.2023.106554
41. Chappuis, J. (1985). Wettability of Solid Surfaces: A Phenomenon Where Adsorption Plays a Major Role. In: Boccara, N., Daoud, M. (eds) Physics of Finely Divided Matter. Springer Proceedings in Physics, vol 5. Springer, Berlin, Heidelberg, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-93301-1_41
42. Pacifico J, Endo K, Morgan S and Mulvaney P, Superhydrophobic effects of self-assembled monolayers on micropatterned surfaces: 3D arrays mimicking the lotus leaf , 2006 Langmuir 22 11072–6, doi: https://doi.org/10.1021/la060925d
43. Pierre Lambert, "Surface tension in microsystems." Engineering Below the Capillary Length (2013), doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-37552-1

44. Zhang, Guotao, et al. "Exudation behavior and pinning effect of the droplet on slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPS)." Surface and Coatings Technology 433 (2022): 128062, doi: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128062
45. Olanrewaju, Ayokunle, et al. "Capillary microfluidics in microchannels: from microfluidic networks to capillaric circuits." Lab on a Chip 18.16 (2018): 2323-2347, doi: https://doi.org/10.1039/C8LC00458G
46. Washburn, E.W ; The dynamics of capillary flow, Physical Review 17(3), 273-283 (1921) ,doi: https://doi.org/10.1103/PhysRev.17.273
47. Lucas, R. Ueber das Zeitgesetz des kapillaren Aufstiegs von Flüssigkeiten. Kolloid-Zeitschrift 23, 15–22 (1918), doi: https://doi.org/10.1007/BF01461107
48. Adamson, A. W. (1990). Physical chemistry of surfaces, Wiley Volume 95, Issue 6, doi: https://doi.org/10.1002/bbpc.19910950629
49. Singh, Ajey, et al. "Zinc oxide nanoparticles: a review of their biological synthesis, antimicrobial activity, uptake, translocation and biotransformation in plants." Journal of materials science 53.1 (2018): 185-201, doi: 10.1007/s10853-017-1544-1
50. M. Kanidi, A. Bardakas, A. Kerasidou, A. Anastasopoulos, C. Tsamis, M. Kandyla; Hierarchical 'rose-petal' ZnO/Si surfaces with reversible wettability reaching complete water repellence without chemical modification, Applied Physics A (2023) 129:320 doi: https://doi.org/10.1007/s00339-023-06529-w
51. Surabhi Sharma et al ;Synthesis and characterization of ZnO nanoparticles prepared by green routes: controlling morphologies by maintaining pH 2024 Phys. Scr. 99 1059b9, 0.1088/1402-4896/ad7ae2
52. M. Munshi, V. N. Singh, Mukesh Kumar, and J. P. Singh; Effect of nanoparticle size on sessile droplet contact angle , Journal of Applied Physics 103, 084315 (2008), doi: http://dx.doi.org/10.1063/1.2912464
53. Gharoy Ahangar E, Abbaspour-Fard MH, Shahtahmassebi N, Khojastehpour M, Maddahi P. Preparation and characterization of PVA/ZnO nanocomposite. J Food Process Preserv doi: 2015;39:1442–51, doi: https://doi.org/10.1111/jfpp.12363
54. W. Zhou, F. Sun, K. Pan et al., "Well-ordered large-pore mesoporous anatase TiO2 with remarkably high thermal stability and improved crystallinity: preparation, characterization, and photocatalytic performance," Advanced Functional Materials, vol. 21, no. 10, pp. 1922–1930, 2011, doi: https://doi.org/10.1002/adfm.201002535