शोध पत्र / Research Paper

कृषि अपशिष्ट को मूल्यवान नैनो सामग्री में रूपांतरित करनाः सतत समाधान – नवाचार और अनुप्रयोग

Transforming Agricultural Waste into Valuable Nanomaterials: Sustainable Solutions - Innovation and Application

साक्षी पुराणिक[1], परीमीता चंचानी[2] एवं प्रीति प्रधान[3]

Sakshi Puranik[1], Parimeeta Chanchani[2] and Preeti Pradhan[3]

[1-3]Mansarovar Global University, Department of Chemistry, Bhopal (M.P.)

[1]sakshi.puranik36@gmail.com, [2]parimeetac@gmail.com, [3]preetjyoti.60@gmail.com

Corresponding author: *sakshi.puranik36@gmail.com

https://doi.org/10.5281/zenodo.19667028

सारांश

कृषि उत्पादन में तेजी से हो रही वृद्धि सीधे तौर पर वैश्विक जनसंख्या में हो रहे इजाफे से जुड़ी हुई है। इसके परिणामस्वरूप, कृषि अपशिष्ट को नवीकरणीय, किफायती और सतत बायो–कॉम्पोजिट उत्पादों के लिए एक संभावित कच्चे माल के रूप में मान्यता प्राप्त हो रही है। अक्सर, बड़ी मात्रा में कृषि उत्पाद अपर्याप्त प्रसंस्करण सुविधाओं या भंडारण ढांचे के अभाव में बर्बाद हो जाते हैं। ये कृषि अपशिष्ट कार्बोहाइड्रेट्स, विभिन्न कार्बनिक यौगिकों और पॉलिमरिक प्रोटीन से भरपूर होते हैं, जो मूल्यवर्धित अनुप्रयोगों के लिए अत्यधिक संभावनाएं प्रदान करते हैं। इसी संदर्भ में, नैनोप्रौद्योगिकी एक परिवर्तनकारी दृष्टिकोण के रूप में उभरी है, जो कृषि अपशिष्ट को मूल्यवान और पर्यावरण अनुकूल उत्पादों में परिवर्तित करने में सक्षम है– वह भी बिना हानिकारक रसायनों के उपयोग के, जो स्वास्थ्य और पर्यावरण के लिए गंभीर खतरे उत्पन्न कर सकते हैं। हालिया शोधों ने कृषि अपशिष्ट से निकाले गए अर्कों का उपयोग करके हरित नैनो सामग्री (ग्रीन नैनोमैटेरियल) संश्लेषण विधियों पर विशेष ध्यान केंद्रित किया है। इन नैनोकणों (NPs) का उपयोग जीवाणुरोधी उपचारों, जल शुद्धिकरण, और औद्योगिक रंगों के अपघटन जैसे विविध क्षेत्रों में व्यापक रूप से किया गया है। यह अध्ययन कृषि अपशिष्ट के स्रोतों, गुणों और नैनो प्रबंधन की जांच करता है, साथ ही प्राप्त नैनो सामग्रियों की संभावनाओं और उनके विभिन्न क्षेत्रों में अनुप्रयोगों को उजागर करता है।

Abstract

The exponential rise in agricultural production is closely tied to the growing global population. As a result, agricultural waste has gained recognition as a promising raw material for creating renewable, cost-effective, and sustainable bio-composite products. Large quantities of agricultural produce are often wasted due to inadequate processing facilities or storage infrastructure. These agro-wastes are rich in carbohydrates, various organic compounds, and polymeric proteins, offering considerable potential for value-added applications. In this context, nanotechnology has emerged as a transformative approach to converting agricultural waste into valuable and environment friendly products without the need for harmful chemicals, which can pose significant health and environmental risks. Recent research has increasingly focused on green nanomaterial (NM) synthesis methods that utilize agricultural waste extracts. These nanoparticles (NPs) have been widely explored for diverse applications, such as antibacterial treatments, water purification, and the degradation of industrial dyes. This aims to explore the sources, properties, and nanomanagement of agro-waste,

highlighting the potential of the derived NMs and their diverse applications in various fields.

मुख्य शब्दः कृषि अपशिष्ट, हरित नैनो सामग्री, संश्लेषण, नवीकरणीय, सतत।

Key words: Agricultural waste, Green nanomaterials, Synthesis, Renewable, Sustainable.

परिचय

कृषि उत्पादन में तेजी से हो रही वृद्धि के साथ–साथ कृषि अपशिष्ट की मात्रा में भी उल्लेखनीय वृद्धि हुई है, जिससे इसके अनुचित निपटान जैसे कि जलाना और लैंडफिलिंग के कारण पर्यावरणीय चुनौतियाँ उत्पन्न हो रही हैं। ये तरीके प्रदूषण और ग्रीनहाउस गैसों के उत्सर्जन में योगदान करते हैं, जिससे सतत अपशिष्ट प्रबंधन रणनीतियों की आवश्यकता और अधिक बढ़ जाती है। नैनोप्रौद्योगिकी में हाल की प्रगति ने कृषि अपशिष्ट को मूल्यवान नैनो सामग्री में परिवर्तित करने के लिए संभावनाओं के नए द्वार खोले हैं, जो परिपथीय अर्थव्यवस्था (Circular Economy) के सिद्धांतों के अनुरूप हैं और पर्यावरणीय स्थिरता को बढ़ावा देते हैं।

कृषि अवशेष जैसे कि सेलूलोज, लिग्निन और काइटिन जैसे बायोपॉलीमर से भरपूर होते हैं, जो विभिन्न नैनो सामग्री के संश्लेषण के लिए आदर्श प्रारंभिक पदार्थ माने जाते हैं। उदाहरणस्वरूप, कृषि अपशिष्ट से निकाली गई नैनोसेलूलोज में उत्कृष्ट यांत्रिक गुण और जैव अपघटनशीलता होती है, जो इसे बायोकॉम्पोजिट, औषधि डिलीवरी प्रणालियों और खाद्य पैकेजिंग सामग्रियों में प्रयोग के लिए उपयुक्त बनाती है। इसी तरह, धान की भूसी से प्राप्त सिलिका नैनोकणों का प्रभावी रूप से जल शुद्धिकरण प्रणालियों में भारी धातुओं और कार्बनिक प्रदूषकों को हटाने के लिए उपयोग किया गया है।

कृषि अपशिष्ट से नैनोकणों का हरित संश्लेषण न केवल पर्यावरण प्रदूषण को कम करता है, बल्कि पारंपरिक नैनो सामग्री उत्पादन में प्रयुक्त खतरनाक रसायनों पर निर्भरता को भी घटाता है। बायोजेनिक संश्लेषण विधियाँ पौधों के अर्कों में उपस्थित प्राकृतिक अपचायक (reducing) और स्थिरीकारक (stabilizing) एजेंट्स का उपयोग करती हैं, जिससे यह प्रक्रिया पर्यावरण–अनुकूल और किफायती बनती है। इसके अतिरिक्त, कृषि अपशिष्ट को नैनो सामग्री में परिवर्तित करने से न केवल अपशिष्ट में कमी आती है, बल्कि कृषि उपोत्पादों को आर्थिक मूल्य भी प्राप्त होता है, जिससे सतत विकास को बढ़ावा मिलता है।

जीवाश्म संसाधनों के अत्यधिक दोहन के कारण उत्पन्न पर्यावरणीय और सामाजिक प्रभावों ने हाल के वर्षों में सतत और पर्यावरण–अनुकूल विकल्पों की खोज को तेज किया है [1]। इनमें लिग्नोसेलूलोसिक पदार्थ उच्च मूल्य वर्धित सामग्री और बायोपॉलीमर के उत्पादन के लिए एक प्रमुख प्राकृतिक स्रोत के रूप में उभरे हैं। ये पदार्थ अपनी जैव अपघटनशीलता, कम घनत्व और उत्कृष्ट यांत्रिक गुणों के कारण विशेष रूप से आकर्षक हैं [2][3]। वर्तमान शोध मुख्यतः कृषि अपशिष्ट के उपयोग पर केंद्रित है, जो मुख्य रूप से सेलूलोज, हेमीसेलूलोज और लिग्निन से बना लिग्नोसेलूलोसिक पदार्थों से समृद्ध होता है।

सेलूलोज, जो प्रकृति में पाया जाने वाला सबसे प्रचुर जैविक पॉलिमर है [4], एक नवीकरणीय और जैव अपघटनशील संसाधन है, जिसे पौधे प्रकाश संश्लेषण के माध्यम से कार्बन डाइऑक्साइड, जल और सूर्य के प्रकाश से उत्पन्न करते हैं। इसकी रासायनिक संरचना साधारण होते हुए भी संशोधित की जा सकती है, जिससे यह रेशे, फिल्म और कार्यात्मक पॉलिमर जैसे कई अनुप्रयोगों के लिए उपयोगी बनती है। इसकी यांत्रिक शक्ति इसके क्रिस्टलीय पॉलिमरिक संरचना से आती है।

लिग्नोसेलूलोसिक बायोमास (LCB) का अध्ययन मुख्य रूप से जैव ईंधन और बायोपॉलीमर जैसे मूल्यवर्धित उत्पादों के उत्पादन की संभावनाओं के लिए किया गया है [5][6][7]। इसके प्रमुख स्रोतों में कृषि, वानिकी और औद्योगिक अवशेष शामिल हैं। LCB का एक प्रमुख घटक, सेलूलोज, ग्लूकोज इकाइयों से बना एक सरल और सीधा प्राकृतिक पॉलिमर है। जैतून के पेड़ों की छंटाई, अर्गन प्रेस केक, सेब का रेशा, अंगूर की बेलों की टहनियाँ, और कपास जैसे

अवशेषों को विभिन्न प्रक्रियाओं द्वारा सेलूलोज नैनोक्रिस्टल (CNC) और सेलूलोज नैनोफाइबर (CNF) में परिवर्तित किया गया है।

नैनोसेलूलोज आधारित सामग्रियाँ खाद्य पैकेजिंग, बायोमेडिसिन, मैट्रिक्स सुदृढ़ीकरण और झिल्ली निस्पंदन जैसे उद्योगों में व्यापक रूप से प्रयुक्त हो रही हैं [8]। हालिया प्रगति ने इसके उपयोग को नैनोकॉम्पोजिट, जैल, एयरोजेल, चिपचिपाहट नियंत्रक, फिल्म, अवरोधक परत, फाइबर, फोम, ऊर्जा भंडारण प्रणाली और निस्पंदन झिल्ली जैसे उत्पादों तक विस्तारित कर दिया है [9]। सेलूलोज की अनूठी संरचना LCB से नैनोसेलूलोज के निष्कर्षण को सक्षम बनाती है, जिसमें प्रयुक्त विधियों के अनुसार उसे CNC या CNF में परिवर्तित किया जा सकता है [10]।

CNC और CNF के उत्पादन के लिए अम्लीय जलअपघटन (acid hydrolysis) और यांत्रिक उपचार प्रमुख विधियाँ हैं, लेकिन इनमें ऊर्जा खपत और जल आवश्यकता की चुनौतियाँ बनी रहती हैं, विशेषकर न्यूट्रलाइजेशन के दौरान [11]। एंजाइमिक जलअपघटन एक आशाजनक और सतत विकल्प प्रदान करता है, जो सेलूलोज को फाइब्रिलेट करने के लिए एंजाइमों के लाभों का उपयोग करता है और ऊर्जा की खपत को कम करता है। हालांकि, एंजाइमों की उच्च लागत एक प्रमुख बाधा है। इस चुनौती को दूर करने के लिए, कुछ अध्ययनों ने एंजाइमिक और यांत्रिक विधियों को जोड़कर बेहतर फाइब्रिलेशन और कम ऊर्जा आवश्यकताओं के लिए समाधान सुझाया है [12][13]।

''नैनोसेलूलोज़'' शब्द विभिन्न नैनो और सूक्ष्म आकार की सेलूलोजिक कणों को दर्शाता है [14]। इसकी संरचना के आधार पर नैनोसेलूलोज को तीन प्रमुख प्रकारों में वर्गीकृत किया गया हैः

1. सेलूलोज नैनोफाइबर (CNF) – सामान्यतः एंजाइमिक और/या यांत्रिक विघटन द्वारा तैयार किया जाता है।

2. सेलूलोज नैनोक्रिस्टल (CNC) – अम्लीय जलअपघटन द्वारा प्राप्त छड़ी–आकार की क्रिस्टलीय कण।

3. बैक्टीरियल नैनोसेलूलोज (BNC) – मुख्य रूप से *Gluconoacetobacter xylinus* जैसे बैक्टीरिया द्वारा संश्लेषित।

AI और केमोमेट्रिक्स का एकीकरणः हालिया रुझानों में नैनो सामग्री के संश्लेषण को अनुकूलित करने के लिए AI–आधारित केमोमेट्रिक विधियों का समावेश देखा गया है। उन्नत एल्गोरिथ्म और सांख्यिकीय विश्लेषणों के माध्यम से, शोधकर्ता विभिन्न प्रक्रियात्मक मानदंडों (जैसे तापमान, प्रतिक्रिया समय और रासायनिक सांद्रता) के प्रभाव को मॉडल कर सकते हैं, जिससे नैनोसेलूलोज कंपोजिट की गुणवत्ता और उत्पादकता का पूर्वानुमान और सुधार संभव होता है। यह दृष्टिकोण न केवल प्रयोगात्मक डिजाइन को तेज करता है, बल्कि बड़े पैमाने पर उत्पादन के लिए पूर्वानुमानात्मक अंतर्दृष्टि भी प्रदान करता है।

उदाहरणस्वरूप, बटलर एवं अन्य द्वारा की गई समीक्षा में मशीन लर्निंग तकनीकों का पदार्थ विज्ञान में प्रयोग की संभावनाओं पर प्रकाश डाला गया है [15]। इसी तरह, रैकुग्लिया एवं अन्य ने सफल और असफल दोनों प्रयोगों से सीखकर संश्लेषण स्थितियों को अनुकूलित करने में मशीन लर्निंग की सहायता प्रदर्शित की [16]। इसके अलावा, किम एवं अन्य ने यह दर्शाया कि किस प्रकार डेटा–आधारित तकनीकें पदार्थ सूचना विज्ञान (materials informatics) को नया आकार दे रही हैं, जो नैनो सामग्री डिजाइन में केमोमेट्रिक दृष्टिकोणों की आधारशिला हैं [17]।

यह शोधपत्र कृषि अपशिष्ट को कार्यात्मक नैनो सामग्री में बदलने के नवीन दृष्टिकोणों की जांच करता है, साथ ही संश्लेषण प्रक्रियाओं को अनुकूलित करने और पूर्वानुमान विश्लेषण के लिए कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI) के एकीकरण की पड़ताल करता है। यह अध्ययन AI–सहायित नैनो सामग्री संश्लेषण की कार्यप्रणालियों की विवेचना करता है और विभिन्न उद्योगों में इसके व्यावहारिक लाभों का मूल्यांकन करते हुए सतत समाधान प्रस्तुत करने का उद्देश्य रखता है, जो अपशिष्ट प्रबंधन और संसाधन उपयोग की चुनौतियों को प्रभावी ढंग से संबोधित कर सकते हैं।

साहित्य समीक्षा

कृषि अपशिष्ट (Agro-waste) को मूल्यवान नैनोमैटेरियल्स (Nanomaterials) में रूपांतरित करना एक नवीन और सतत तकनीकी समाधान के रूप में दृष्टिगत हुआ है। पारंपरिक अपशिष्ट प्रबंधन जैसे जलाना या लैंडफिल में डालना, पर्यावरण पर गंभीर प्रभाव डालता है और ग्रीनहाउस गैसों के उत्सर्जन को बढ़ाता है। इन समस्याओं से निपटने के लिए वैज्ञानिक समुदाय अब कृषि अपशिष्ट को उपयोगी उत्पादों में बदलने के प्रयास कर रहा है।

कृषि अपशिष्ट में सेल्यूलोज, लिग्निन, हेमीसेल्यूलोज जैसे बायोपॉलीमर प्रचुर मात्रा में पाए जाते हैं, जो नैनोसामग्री निर्माण के लिए उत्कृष्ट कच्चा माल हैं [18]। उदाहरण के लिए, चावल की भूसी (rice husk) से सिलिका नैनोकण बनाए जाते हैं जिनका उपयोग जल शोधन और भारी धातुओं को हटाने में किया जाता है [19]।

हरित नैनोप्रौद्योगिकी (Green nanotechnology) में पौधों के अर्क का उपयोग करके नैनोकणों का जैविक संश्लेषण (biogenic synthesis) किया जाता है, जिससे हानिकारक रासायनिक रिएक्टेंट्स की आवश्यकता नहीं होती [20]। इस प्रक्रिया में मौजूद प्राकृतिक अवयव जैसे पॉलीफेनोल्स और एंटीऑक्सीडेंट नैनोकणों के निर्माण में सहायक होते हैं।

सेल्यूलोज नैनोकणों (Nanocellulose) का उपयोग खाद्य पैकेजिंग, औषध वितरण प्रणाली और जैव–चिकित्सा अनुप्रयोगों में हो रहा है [21]। नैनोसेल्यूलोज को एसिड हाइड्रोलिसिस या यांत्रिक प्रक्रिया द्वारा कृषि अपशिष्ट से निकाला जा सकता है। हालांकि, इन प्रक्रियाओं में ऊर्जा और जल की खपत एक बड़ी चुनौती है, जिसे एंजाइम आधारित विधियों द्वारा कम किया जा सकता है।

आर्टिफिशियल इंटेलिजेंस (AI) और केमोट्रिक्स (chemometrics) का उपयोग अब नैनोमटेरियल संश्लेषण प्रक्रिया को अनुकूलित करने के लिए किया जा रहा है। AI आधारित मॉडल तापमान, समय और रसायन की सांद्रता जैसे कारकों का विश्लेषण करके संश्लेषण की उपज और गुणवत्ता की भविष्यवाणी कर सकते हैं [22]। इससे न केवल लागत कम होती है, बल्कि पर्यावरणीय प्रभाव भी घटता है [23] ।

हाल के अध्ययनों में यह स्पष्ट हुआ है कि कृषि अपशिष्ट से बने नैनोमटेरियल जल शोधन, रंग हटाने, जीवाणुरोधी गतिविधियों और खाद्य संरक्षण में अत्यंत प्रभावी हैं [24]। यह तकनीक सतत विकास लक्ष्यों (SDGs) के साथ मेल खाती है क्योंकि यह अपशिष्ट को मूल्यवान उत्पादों में बदलती है और पर्यावरणीय प्रभाव को न्यूनतम करती है [25]।

सामग्री एवं विधियाँ

1. कृषि अपशिष्ट संग्रहण

शक्कर गन्ने की खोई (Sugarcane Bagasse), धान की पराली (Rice Straw) और नारियल का छिलका (Coconut Husk) को इंदौर और उसके आस–पास के ग्रामीण क्षेत्रों में स्थित मिलिंग उद्योगों और स्थानीय बाजारों से एकत्र किया गया ताकि ताजा प्रसंस्कृत कृषि अवशेषों की उपलब्धता सुनिश्चित की जा सके।

गन्ने की खोई और धान की पराली को 20–22 अगस्त, 2024 को स्थानीय मिलों में फसल कटाई के बाद की प्रक्रिया के दौरान संग्रहित किया गया, जबकि नारियल के छिलके 5–6 सितंबर, 2024 को उन बाजारों से लिए गए जहाँ नारियल प्रसंस्करण की गतिविधियाँ प्रमुख थीं। सभी नमूनों को मिट्टी, पत्थर या अन्य फसल अपशिष्ट जैसे संदूषकों से मुक्त रखा गया। एकत्रित अवशेषों को साफ और लेबल किए गए पॉलीइथिलीन बैग में रखा गया ताकि प्रदूषण न हो।

नमूनों को अतिरिक्त नमी हटाने हेतु सूर्य की रोशनी में सुखाया गया। इसके लिए अवशेषों को साफ तिरपाल पर 3–4 दिनों तक (23–26 अगस्त, 2024 तक गन्ने की खोई व धान की पराली; 7–10 सितंबर, 2024 तक नारियल का छिलका) फैला दिया गया और

नियमित अंतराल पर पलटा गया। जब अवशेष भुरभुरा हो गया, जिससे पर्याप्त नमी हटने की पुष्टि हुई, तब उन्हें एयर–टाइट कंटेनरों में संग्रहित किया गया।

2. नमूना तैयारी (Sample Preparation)

सुखाए गए कृषि अपशिष्टों (गन्ने की खोई, धान की पराली, नारियल छिलका) को यांत्रिक ग्राइंडर से महीन चूर्ण में पीसा गया। फिर चूर्ण को 40 या 60–मेश चलनी से छाना गया ताकि एकसमान कण आकार मिल सके।

क्षार उपचार (Alkali Treatment) के लिए 10 ग्राम प्रत्येक नमूना 150–200 मिलीलीटर 5% सोडियम हाइड्रॉक्साइड (NaOH) में रखा गया और 80–100°C पर 3 घंटे तक चुंबकीय हॉटस्टिरर पर गर्म किया गया। इस प्रक्रिया से लिग्निन और हेमीसेल्युलोज हट गया, जबकि सेल्युलोज संरक्षित रहा। मिश्रण को वैक्यूम फिल्टर से छाना गया और आसुत जल से अच्छी तरह धोया गया। फिर नमूनों को 60°C पर 5–6 घंटे तक एयर–सर्कुलेटिंग ओवन में सुखाया गया।

3. अपलिग्नीकरण प्रक्रिया (Delignification Process)

इस प्रक्रिया में पहले की तरह ग्राइंडिंग और चलनी प्रक्रिया के बाद, नमूनों को फिर से 5% NaOH के साथ 80–100°C पर 3 घंटे तक गर्म किया गया। धोने और सुखाने की विधि समान रही, जिससे शुद्ध सेल्युलोज फाइबर्स प्राप्त किए गए [25]।

4. सेल्युलोज नैनोकोम्पोज़िट्स की तैयारी

शुद्ध सेल्युलोज फाइबर को यांत्रिक, रासायनिक या संयुक्त तकनीकों से नैनोस्तर पर तोड़ा गया। प्राप्त नैनोकोम्पोज़िट्स की संरचनात्मक व रूपात्मक विशेषताओं का मूल्यांकन किया गया।

नैनोमैटेरियल्स की विशेषता जांच (Characterization Techniques)

1. स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM) विश्लेषण

नमूनों पर सोने या प्लेटिनम की पतली परत चढ़ाई गई और SEM द्वारा उच्च–रिजॉल्यूशन छवियाँ प्राप्त की गईं ताकि उनके कणों के आकार और एकरूपता की पुष्टि हो सके [27]।

2. भारी धातु सोखने की क्षमता परीक्षण

क्रोमियम आयन संदूषण की नकल के लिए पोटैशियम क्रोमेट (K_2CrO_4) की कृत्रिम घोलें तैयार की गईं (Cr–1 से Cr–4 तक)। निर्धारित मात्रा में सेल्युलोज नैनोकोम्पोजिट को इन घोलों में मिलाकर 1 घंटे तक घुमाया गया। बाद में घोल को फिल्टर कर क्रोमियम आयनों की शेष मात्रा को Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS–200) द्वारा मापा गया [27]।

3. सोखने की दक्षता (Adsorption Efficiency)

क्रोमियम सोखने की प्रतिशत क्षमता इस सूत्र से गणना की गईः

$$\text{क्रोमियम अवशोषण दक्षता } (\%) = \frac{(\text{प्रारंभिक क्रोमियम सांद्रता} - \text{अवशिष्ट क्रोमियम सांद्रता})}{\text{प्रारंभिक क्रोमियम सांद्रता}} \times 100$$

परिणाम

एआई और केमोमेट्रिक विश्लेषण (AI and Chemometric Analysis):

एक एआई–संचालित केमोमेट्रिक दृष्टिकोण का उपयोग नैनोकोम्पोज़िट्स के संश्लेषण मापदंडों को अनुकूलित करने और उनके अवशोषण क्षमता की पूर्वानुमान लगाने के लिए किया गया।

SEM (स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी), रासायनिक संरचना, और क्रोमियम अवशोषण परीक्षणों से प्राप्त आंकड़ों को मशीन लर्निंग मॉडल्स में इनपुट के रूप में डाला गया। इन मॉडलों ने विभिन्न प्रोसेसिंग पैरामीटर्स (जैसे तापमान, प्रतिक्रिया समय, NaOH की सांद्रता आदि) के प्रभाव का विश्लेषण किया और सबसे उपयुक्त शर्तों की पहचान की।

इस दृष्टिकोण ने न केवल प्रयोगात्मक डिजाइन को अधिक कुशल बनाया, बल्कि इसने यह भी पूर्वानुमान लगाया कि किन परिस्थितियों में नैनोकोम्पोज़िट्स सर्वोत्तम प्रदर्शन करेंगे।

इस प्रकार, यह तकनीक न केवल समय और संसाधनों की बचत करती है, बल्कि उच्च गुणवत्ता वाले उत्पाद प्राप्त करने में भी सहायता करती है।

1. कृषि अपशिष्ट संग्रहण और सुखाने की प्रक्रिया (Agricultural Waste Collection and Drying – हिंदी में)

सेलुलोज नैनोकोम्पोजिट्स के संश्लेषण के लिए गन्ने की खोई (Sugarcane Bagasse), धान का पुआल (Rice Straw) और नारियल का बाहरी खोल (Coconut Husk) इंदौर और आसपास के ग्रामीण क्षेत्रों से एकत्रित किए गए। एकत्र किए गए अवशेषों की सावधानीपूर्वक जाँच की गई ताकि मिट्टी, पत्थर या अन्य फसल कचरे जैसे अशुद्धियों को हटाया जा सके।

- **गन्ने की खोई** स्थानीय शुगर मिलों से,
- **धान का पुआल** चावल मिलों से,
- और **नारियल का खोल** स्थानीय बाजारों से प्राप्त किया गया।

प्रत्येक प्रकार के कृषि अपशिष्ट को सूरज की रोशनी में चार दिनों तक सुखाया गया ताकि उनमें मौजूद नमी को प्रभावी ढंग से हटाया जा सके। जब ये सामग्री पर्याप्त रूप से सूख गई और भुरभुरी हो गई, तब उन्हें रासायनिक उपचार के लिए तैयार करने हेतु महीन चूर्ण में पीस लिया गया।

2. कृषि अवशेषों की प्रोसेसिंग और विश्लेषण (Agricultural Waste Processing and Analysis)

सूखाने, पीसने और क्षारीय उपचार (alkali treatment) की प्रक्रियाओं के बाद गन्ने की खोई, धान का पुआल और नारियल के खोल से उच्च–शुद्धता वाले सेलुलोज फाइबर प्राप्त किए गए। इन फाइबर्स को आगे नैनोकम्पोजिट संश्लेषण के लिए उपयोग किया गया।

तालिका 1: कृषि अवशेष प्रोसेसिंग के मापदंडों का सारांश

पैरामीटर	गन्ने की खोई	धान की पराली	नारियल की भूसी
संग्रह स्रोत	शुगर मिल्स	राइस मिल्स	स्थानीय बाजार
सुखाने की विधि	धूप में सुखाना	धूप में सुखाना	धूप में सुखाना
सुखाने की अवधि	4 दिन	4 दिन	4 दिन
प्रयुक्त जाली आकार	50–मेश	40–मेश	60–मेश
कण आकार सीमा	0.30–0.60 मिमी	0.42–0.84 मिमी	0.25–0.50 मिमी
क्षारीय उपचार	5% NaOH, 80–100ºC, 3 घंटे	5% NaOH, 80–100ºC, 3 घंटे	5% NaOH, 80–100ºC, 3 घंटे
उपचार के बाद सुखाना	60ºC पर 5–6 घंटे	60ºC पर 5–6 घंटे	60ºC पर 5–6 घंटे

2. पीसने और छानने के बाद कण आकार वितरण

पीसे गए अवशेषों को समान कण आकार प्राप्त करने के लिए छाना गया, जिससे सेल्यूलोज निष्कर्षण के लिए उपयुक्त आकार सुनिश्चित हो सके। गन्ने की खोई को 50–मेश छलनी से छाना गया, जिससे 0.30 से 0. 60 मिमी के कण आकार प्राप्त हुए। धान की पराली को पीसने के बाद 40–मेश छलनी से गुजारा गया, जिससे 0.42 से 0.84 मिमी के कण आकार प्राप्त हुए। नारियल की भूसी, जो कि रेशेदार प्रकृति की होती है, को 60–मेश छलनी से छाना गया, जिससे 0.25 से 0.50 मिमी के कण आकार प्राप्त हुए।

इन छने हुए पाउडरों को आगे 5% सोडियम हाइड्रॉक्साइड (NaOH) घोल से उपचारित किया गया, जिससे लिग्निन और हेमिसेलुलोज को हटाया जा सके और नैनोकॉम्पोजिट संश्लेषण के लिए शुद्ध सेल्यूलोज फाइबर प्राप्त किए जा सकें।

3. क्षारीय उपचार और लिग्निन हटाना (डेलिग्निफिकेशन)

क्षारीय उपचार को 80–100°C के तापमान पर तीन घंटे तक किया गया ताकि कृषि अपशिष्टों में मौजूद लिग्निन और हेमिसेलुलोज को तोड़ा जा सके। उपचारित नमूनों को उसके बाद फिल्टर किया गया और शेष रासायनिक अवशेषों को हटाने के लिए आसुत जल (डिस्टिल्ड वॉटर) से अच्छी तरह धोया गया। प्राप्त सेल्यूलोज–समृद्ध रेशों को 60°C पर एयर–सर्कुलेटिंग ओवन में 5–6 घंटे तक सुखाया गया ताकि गैर–सेल्यूलोज घटकों को पूरी तरह से हटाया जा सके। इस प्रक्रिया ने सेल्यूलोज रेशों की शुद्धता को प्रभावी रूप से बढ़ाया, जिससे वे नैनोकॉम्पोजिट संश्लेषण के लिए उपयुक्त हो गए।

1. नैनोकॉम्पोजिट संश्लेषण और विश्लेषण

सेल्यूलोज रेशों को सफलतापूर्वक नैनोकॉम्पोजिट में परिवर्तित किया गया। SEM (स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी) विश्लेषण से यह ज्ञात हुआ कि इनमें एक समान रेशेदार संरचना है, जिसकी माप नैनो स्तर (60–90 nm) पर है। तालिका 2 में इसके विश्लेषण संबंधी विवरण दिए गए हैं।

तालिका 2: नैनोकॉम्पोजिट विशेषण डेटा

स्रोत	औसत कण आकार (nm)	सतही संरचना	टिप्पणियाँ
गन्ने की खोई	60–85	समान, रेशेदार जालिका	लिग्निन की प्रभावी रूप से सफाई की पुष्टि
धान की पराली	70–90	समान, रेशेदार जालिका	कणों का सुसंगत वितरण
नारियल की भूसी	65–88	समान, रेशेदार जालिका	उच्च शुद्धता और न्यूनतम एकत्रीकरण (एग्लोमेरेशन)

परिशोधित सेल्यूलोज रेशों को यांत्रिक और रासायनिक उपचारों के माध्यम से नैनो स्तर के सेल्यूलोज कणों में परिवर्तित किया गया।

स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM) का उपयोग संश्लेषित नैनोकॉम्पोजिट की सतही संरचना और कण आकार वितरण का विश्लेषण करने के लिए किया गया। SEM छवियों से यह स्पष्ट हुआ कि सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट में एक समान और आपस में जुड़ा हुआ रेशेदार नेटवर्क था, जिसमें कण आकार मुख्यतः 60–90 नैनोमीटर की सीमा में पाए गए।

- **गन्ने की खोई**: कण आकार सीमा 60–85 नैनोमीटर
- **धान की पराली**: कण आकार सीमा 70–90 नैनोमीटर
- **नारियल की भूसी**: कण आकार सीमा 65–88 नैनोमीटर

सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट की चिकनी और एकसमान सतह से यह संकेत मिलता है कि **क्षारीय उपचार और डेलिग्निफिकेशन** के माध्यम से अशुद्धियों को सफलतापूर्वक हटाया गया है।

ये निष्कर्ष पुष्टि करते हैं कि संश्लेषित नैनोकॉम्पोजिट में वांछनीय संरचनात्मक गुण मौजूद हैं, जिससे वे **अधिशोषक** (adsorbents) और **कंपोजिट निर्माण में सुदृढीकरण सामग्री** जैसे विभिन्न अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त हैं।

5. क्रोमियम अवशोषण दक्षता

सेल्यूलोज़ नैनोकॉम्पोज़िट की अवशोषण क्षमता का मूल्यांकन करने के लिए, पोटेशियम क्रोमेट (K_2CrO_4) के कृत्रिम घोल विभिन्न क्रोमियम सांद्रणों के साथ तैयार किए गए। प्रत्येक घोल में निश्चित मात्रा में सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोज़िट मिलाया गया, और **एक घंटे तक** अवशोषण प्रक्रिया चलाई गई। इसके बाद घोल को फिल्टर किया गया और शेष क्रोमियम आयन की सांद्रता को **एटॉमिक एब्जॉर्प्शन स्पेक्ट्रोफोटोमीटर** (AAS–200) के माध्यम से मापा गया।

K_2CrO_4 आधारित क्रोमियम अवशोषण प्रयोगों से यह सिद्ध हुआ कि इन नैनोकॉम्पोजिट्स की अवशोषण दक्षता उच्च रही। विभिन्न प्रारंभिक सांद्रणों के लिए क्रोमियम में प्रतिशत कमी की गणना की गई। इसका विवरण तालिका 3 में प्रस्तुत है।

तालिका 3: विभिन्न कृषि अपशिष्ट–आधारित नैनोकॉम्पोज़िट्स के लिए क्रोमियम अवशोषण दक्षता

कृषि अपशिष्ट स्रोत	प्रारंभिक क्रोमियम सांद्रता (mg/L)	प्रतिशत कमी (%)
गन्ने की खोई	15	65.3
धान की पराली	20	60.8
नारियल की भूसी	30	57.3

परिणामों का विश्लेषण और निष्कर्ष

परिणामों से यह सिद्ध हुआ कि सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट्स में क्रोमियम के प्रति उच्च अवशोषण दक्षता मौजूद है। क्रोमियम की प्रारंभिक सांद्रता के अनुसार अवशोषण दक्षता में अंतर देखा गया। कम प्रारंभिक सांद्रता (15 mg/L) पर क्रोमियम में 65.3% की कमी दर्ज की गई, जबकि उच्च सांद्रता (30 mg/L) पर यह दक्षता घटकर 57.3% रह गई।

यह प्रवृत्ति दर्शाती है कि नैनोकॉम्पोज़िट्स की अवशोषण क्षमता कम सांद्रण पर अधिक प्रभावी होती है, जबकि क्रोमियम की मात्रा बढ़ने पर उसमें थोड़ी कमी आ जाती है।

ये निष्कर्ष इस बात पर प्रकाश डालते हैं कि कृषि अपशिष्ट से प्राप्त सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोज़िट्स भारी धातुओं को हटाने के लिए प्रभावी अवशोषक के रूप में कार्य कर सकते हैं।

संश्लेषित नैनोकॉम्पोज़िट्स में उत्कृष्ट अवशोषण क्षमताएं हैं, जो उन्हें पर्यावरणीय शोधन (environmental remediation) अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त बनाती हैं।

प्रयोगात्मक परिणामों से यह भी सिद्ध होता है कि कृषि अपशिष्ट को उच्च गुणवत्ता वाले सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोज़िट्स में प्रभावी रूप से परिवर्तित किया जा सकता है, जिनमें पर्यावरणीय शोधन की महत्वपूर्ण संभावनाएं हैं।

इस अध्ययन में AI (कृत्रिम बुद्धिमत्ता) और केमोमेट्रिक तकनीकों के उपयोग ने यह गहराई से समझने में मदद की कि विभिन्न प्रक्रिया मापदंड नैनोकॉम्पोज़िट के गुणों को कैसे प्रभावित करते हैं।

पूर्वानुमानात्मक मॉडल (predictive models) ने संश्लेषण प्रक्रिया को बेहतर बनाने में मदद की, जिससे सुसंगत कण आकार वितरण और बेहतर भारी धातु अवशोषण दक्षता सुनिश्चित हुई।

SEM छवियों में दिखाई देने वाला समान रेशेदार नेटवर्क इस बात की पुष्टि करता है कि क्षारीय उपचार और डेलिग्निफिकेशन प्रक्रियाएं प्रभावी रही हैं।

उच्च क्रोमियम अवशोषण दक्षता यह संकेत देती है कि ये सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोज़िट्स सतत (sustainable), कम लागत वाले और प्रभावशाली जल शुद्धिकरण एवं पर्यावरणीय सफाई समाधान प्रदान कर सकते हैं।

6. निष्कर्ष

इस अध्ययन में कृषि अपशिष्ट–गन्ने की खोई, धान की पराली और नारियल की भूसी–से सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोज़िट्स का सफलतापूर्वक संश्लेषण किया गया और इन्हें क्रोमियम आयनों के जलीय घोल से अवशोषण में प्रभावी पाया गया। अवशोषण दक्षता क्रमशः गन्ने की खोई (65.3%), धान की पराली (60.8%), और नारियल की भूसी (57.3%) के लिए दर्ज की गई। ये निष्कर्ष इस ओर संकेत करते हैं कि कृषि अपशिष्ट से प्राप्त सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोज़िट्स भारी धातुओं को दूषित जल स्रोतों से हटाने में अत्यधिक प्रभावी हो सकते हैं।

प्राप्त अवशोषण दक्षताएं सेल्यूलोज़–आधारित सामग्रियों पर किए गए पूर्व शोध के अनुरूप हैं:

• अशरफी एवं अन्य (2022) [28] ने सोडा बगास पल्प से प्राप्त सेल्यूलोज़ नैनोक्रिस्टल्स (CNCs) के माध्यम से Cd^{2+} और Pb^{2+} जैसे भारी धातु आयनों को हटाने का प्रदर्शन किया। उन्होंने सक्सिनिक एनहाइड्राइड से संशोधित CNCs की अधिकतम अवशोषण क्षमता को pH 6 पर रेखांकित किया। Pb^{2+} आयनों के प्रति अधिक झुकाव हमारे अध्ययन में देखे गए Cr^{6+} अवशोषण व्यवहार से मेल खाता है।

• जिआंग एवं अन्य (2023) [29] ने कृषि पराली से संश्लेषित पॉलीपायरोल–संशोधित नैनोसेल्यूलोज़ के माध्यम से Hg^{2+} आयनों की अत्यधिक अवशोषण क्षमता बताई। यह क्षमता कॉम्पोजिट की सतह पर प्रचुर कार्यात्मक समूहों के कारण थी, जो भारी धातुओं को प्रभावी रूप से हटाने में सहायक होते हैं।

• शर्मा एवं अन्य (2021) [30] ने लिग्नोसेल्यूलोसिक बायोमास से प्राप्त नैनोसेल्यूलोज़ पर आधारित एक समीक्षा में बताया कि इन पदार्थों की उच्च सतह क्षेत्र, रासायनिक संशोधन क्षमता और कम लागत उन्हें जल उपचार के लिए उपयुक्त बनाती है।

इस अध्ययन ने यह सिद्ध किया कि कृषि अपशिष्ट से प्राप्त नैनोकॉम्पोज़िट्स न केवल भारी धातुओं के शोधन के लिए कारगर हैं, बल्कि AI–आधारित केमोमेट्रिक विश्लेषण के साथ समन्वय करके प्रक्रिया अनुकूलन और विश्लेषण में भी महत्वपूर्ण सुधार प्राप्त किए जा सकते हैं।

इसके अतिरिक्त, इन नैनोकॉम्पोज़िट्स का उपयोग प्लास्टिक के पारंपरिक विकल्प के रूप में करने की संभावनाएं उभरती हैं, जिससे प्लास्टिक प्रदूषण को कम करने और पर्यावरणीय स्थिरता को बढ़ावा देने में सहायता मिल सकती है।

भविष्य की संभावनाएं

1. प्लास्टिक में कमी की रणनीतियों के साथ एकीकरण: जल शुद्धिकरण से आगे बढ़ते हुए, कृषि अपशिष्ट से प्राप्त सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोज़िट्स पारंपरिक प्लास्टिक के प्रभावशाली विकल्प प्रस्तुत करते हैं। इनकी बायोडिग्रेडेबिलिटी (जैव–अपघटन क्षमता) और मजबूत यांत्रिक गुण इन्हें ईको–फ्रेंडली बायोप्लास्टिक और टिकाऊ पैकेजिंग सामग्री के विकास के लिए उपयुक्त बनाते हैं। इन सामग्रियों को विभिन्न कॉम्पोज़िट फॉर्मूलों में शामिल करके प्लास्टिक उपयोग को घटाया जा सकता है और कृत्रिम पॉलिमर से संबंधित प्रदूषण को कम किया जा सकता है।

2. AI–आधारित अनुकूलन में प्रगति: भविष्य के अनुसंधान में AI और केमोमेट्रिक विश्लेषण का और अधिक उपयोग करके न केवल संश्लेषण प्रक्रिया को परिष्कृत किया जा सकता है, बल्कि नैनोकॉम्पोज़िट्स को विशेष औद्योगिक अनुप्रयोगों के लिए अनुकूलित भी किया जा सकता है।

यह रणनीति उन सामग्रियों के विकास की ओर ले जा सकती है जो वातावरणीय शोधन से लेकर जैवचिकित्सा अनुप्रयोगों तक विस्तृत क्षेत्रों में उच्च प्रदर्शन प्रदान कर सकें।

आभार

लेखक रसायन विभाग, मानसरोवर ग्लोबल विश्वविद्यालय, भोपाल (म.प्र.), का इस शोध कार्य के दौरान संसाधन और सहयोग प्रदान करने के लिए हार्दिक आभार व्यक्त करते हैं। विशेष धन्यवाद उन सहयोगियों और सहकर्मियों को, जिन्होंने इस अध्ययन में अपने महत्वपूर्ण विचारों और विशेषज्ञता के माध्यम से अमूल्य योगदान दिया।

हितों का टकराव विवरण : लेखक यह घोषणा करते हैं कि उनका कोई स्वार्थसिद्धि या हितों का टकराव नहीं है।

संदर्भ

1. Agegnehu, G., Srivastava, A. K., and Bird, M. I. (2017). "The Role of Biochar and Biochar-Compost in Improving Soil Quality and Crop Performance: A Review," Applied Soil Ecology, vol. 119, pp. 156-170. [Google Scholar] [CrossRef]

2. Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D., and Hipps, N. A. (2010). "Potential Mechanisms for Achieving Agricultural Benefits from Biochar Application to Temperate Soils: A Review," Plant and Soil, vol. 337, pp. 1-18. [Google Scholar] [CrossRef]

3. Chen, P., Liu, Y., Mo, C., Jiang, Z., Yang, J., and Lin, J. (2021). "Microbial Mechanism of Biochar Addition on Nitrogen Leaching and Retention in Tea Soils from Different Plantation Ages," Science of the Total Environment, vol. 757, p. 143817. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

4. Chen, Z., Liu, J., Sun, H., Xing, J., Zhang, Z., and Jiang, J. (2023). "Effects of Biochar Applied in Either Rice or Wheat Seasons on the Production and Quality of Wheat and Nutrient Status in Paddy Profiles," Plants, vol. 12, p. 4131. [Google Scholar] [CrossRef]

5. Cornelissen, G., Jubaedah, Nurida, N. L., Hale, S. E., Martinsen, V., Silvani, L., and Mulder J. (2018). "Fading Positive Effect of Biochar on Crop Yield and Soil Acidity during Five Growth Seasons in an Indonesian Ultisol," Science of the Total Environment, vol. 634, pp. 561-568. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

6. Curaqueo, G., Meier, S., Khan, N., Cea, M., and Navia, R. (2014). "Use of Biochar on Two Volcanic Soils: Effects on Soil Properties and Barley Yield," Journal of Soil Science and Plant Nutrition, vol. 14, pp. 911-924. [Google Scholar] [CrossRef]

7. El-Fattah, D. A. A., Hashem, F. A., and Abd-Elrahman, S. H. (2022). "Impact of Applying Organic Fertilizers on Nutrient Content of Soil and Lettuce Plants, Yield Quality and Benefit-Cost Ratio under Water Stress Conditions," Asian Journal of Agriculture and Biology, vol. 2022, p. 202102086. [Google Scholar] [CrossRef]

8. Galinato, S. P., Yoder, J. K., and Granatstein, D. (2011). "The Economic Value of Biochar in Crop Production and Carbon Sequestration," Energy Policy, vol. 39, pp. 6344-6350. [Google Scholar] [CrossRef]

9. Godlewska, P., Ok, Y. S., and Oleszczuk, P. (2021). "The Dark Side of Black Gold: Ecotoxicological Aspects of Biochar and Biochar-Amended Soils," Journal of Hazardous Materials, vol. 403, p. 123833. [Google Scholar] [CrossRef]

10. Hussain, M., Farooq, M., Nawaz, A., Al-Sadi, A. M., Solaiman, Z. M., Alghamdi, S. S., Ammara, U., Ok, Y. S., and Siddique, K. H. M. (2017). "Biochar for Crop Production: Potential Benefits and Risks," Journal of Soils and Sediments, vol. 17, pp. 685-716. [Google Scholar] [CrossRef].

11. Igalavithana, A. D., Lee, S. E., Lee, Y. H., Tsang, D. C. W., Rinklebe, J., Kwon, E. E., and Ok, Y. S. (2017). "Heavy Metal Immobilization and Microbial Community Abundance by Vegetable Waste and Pine Cone Biochar of Agricultural Soils," Chemosphere, vol. 174, pp. 593-603. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

12. Jeyasubramanian, K., Thangagiri, B., Sakthivel, A., Raja, J. D., Seenivasan, S., Vallinayagam, P., Madhavan, D., Devi, S. M., and Rathika, B. (2021). "A Complete Review on Biochar: Production, Property, Multifaceted Applications, Interaction Mechanism and Computational Approach," Fuel, vol. 292, p. 120243. [Google Scholar] [CrossRef]

13. Lehmann, J. (2007). "Bio-energy in the Black," Frontiers in Ecology and the Environment, vol. 5, pp. 381-387. [Google Scholar] [CrossRef]

14. Mateo, S., Peinado, S., Morillas-Gutiérrez, F., La Rubia, M. D., and Moya, A. J. (2021). "Nanocellulose from Agricultural Wastes:

Products and Applications-A Review," Processes, vol. 9, no. 9, p. 1594.

15. Nair, V. D., Nair, P. K. R., Dari, B., Freitas, A. M., Chatterjee, N., and Pinheiro, F. M. (2017). "Biochar in the Agroecosystem-Climate-Change-Sustainability Nexus," Frontiers in Plant Science, vol. 8, p. 2051. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
16. Omondi, M. O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X., Korai, P. K., and Pan, G. (2016). "Quantification of Biochar Effects on Soil Hydrological Properties Using Meta-Analysis of Literature Data," Geoderma, vol. 274, pp. 28-34. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Pandit, N. R., Mulder, J., Hale, S. E., Zimmerman, A. R., Pandit, B. H., and Cornelissen, G. (2018). "Multi-year Double Cropping Biochar Field Trials in Nepal: Finding the Optimal Biochar Dose through Agronomic Trials and Cost-Benefit Analysis," Science of the Total Environment, vol. 637, pp. 1333-1341. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
18. Sahota, S. et al., (2018). "Characterization of Leaf Waste Based Biochar for Cost Effective Hydrogen Sulphide Removal from Biogas," Bioresource Technology, vol. 250, pp. 635-641. [Google Scholar] [CrossRef]
19. Sänger, A. et al. (2017). "Biochar Application to Sandy Soil: Effects of Different Biochars and N Fertilization on Crop Yields in a 3-year Field Experiment," Archives of Agronomy and Soil Science, vol. 63, pp. 213-229. [Google Scholar] [CrossRef]
20. Shackley, S. et al. (2012). "Biochar, Tool for Climate Change Mitigation and Soil Management," in Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Springer, New York, NY, USA, pp. 845-893. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Vijay, V. K., Kapoor, R., Trivedi, A., and Vijay, V. (2015). "Biogas as Clean Fuel for Cooking and Transportation Needs in India," in Advances in Bioprocess Technology, Springer International Publishing, Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 257-275. [Google Scholar] [CrossRef]
22. Yi, Z., Jeyakumar, P., Yin, C., and Sun, H. H. (2023). "Effects of Biochar in Combination with Varied N Inputs on Grain Yield, N Uptake, NH_3 Volatilization, and N_2O Emission in Paddy Soil," Frontiers in Microbiology, vol. 14, p. 1174805. [Google Scholar] [CrossRef]
23. Yu, H., Zou, W., Chen, J., Chen, H., Yu, Z., Huang, J., Tang, H., Wei, X., and Gao, B. (2019). "Biochar Amendment Improves Crop Production in Problem Soils: A Review," Journal of Environmental Management, vol. 232, pp. 8-21. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed].
24. Zhang, A., Bian, R., Pan, G., Cui, L., Hussain, Q., Li, L., Zheng, J., Zheng, J., Zhang, X., Han, X. et al. (2012). "Effects of Biochar Amendment on Soil Quality, Crop Yield and Greenhouse Gas Emission in a Chinese Rice Paddy: A Field Study of 2 Consecutive Rice Growing Cycles," Field Crops Research, vol. 127, pp. 153-160. [Google Scholar] [CrossRef]
25. Zhang, Y., Ding, J., Wang, H., Su, L., and Zhao, C. (2020). "Biochar Addition Alleviates the Negative Effects of Drought and Salinity Stress on Soybean Productivity and Water Use Efficiency," BMC Plant Biology, vol. 20, p. 288. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
26. Zhang, Y., Wang, J., and Feng, R. (2021). "The Effects of Biochar Addition on Soil Physicochemical Properties: A Review," Catena, vol. 202, p. 105284. [Google Scholar] [CrossRef]

27. Ashrafi Birgani, S., Talaeipour, M., Hemmasi, A., Bazyar, B., and Larijani, K. (2022). "Removal of Heavy Metal Ions Using Cellulose Nanocrystals and Succinic Anhydride-Modified Cellulose Nanocrystals Prepared from Bleached Soda Bagasse Pulp," BioResources, vol. 17, no. 3, pp. 4886-4904.

28. Xiong, Q., Zhang, L., Zhu, Z., Xu, G., Jing, J., Zhang, W., Zhang, C., and Ye, X. (2023). "Polypyrrole-Modified Nanocellulose Exhibits Superior Performance for Hg(II) Adsorption," Polymers, vol. 15, no. 12, p. 2735.

29. Mazibuko, M. T., Onwubu, S. C., Mokhothu, T. H., Paul, V., and Mdluli, P. S. (2024). "Unlocking Heavy Metal Remediation Potential: A Review of Cellulose-Silica Composites," Sustainability, vol. 16, no. 8, p. 3265.

30. Nag S., and Biswas, S. (2020). "Cellulose-Based Adsorbents for Heavy Metal Removal," in Green Adsorbents to Remove Metals, Dyes and Boron from Polluted Water, Springer, pp. 113-142.

31. Sharma, A., Anjana, Rana, H., and Goswami, S. (2021). "A Comprehensive Review on the Heavy Metal Removal for Water Remediation by the Application of Lignocellulosic Biomass-Derived Nanocellulose," Journal of Polymers and the Environment, vol. 30, pp. 1-18.

32. Butler, K. T., Davies, D. W., Cartwright, H., Isayev, O., and Walsh, A. (2018). "Machine Learning for Molecular and Materials Science," Nature, vol. 559, no. 7715, pp. 547-555. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0337-2

33. Raccuglia, P., Elbert, K. C., Adler, P. D. F., Fuhrman, J. A., Grice, J., Swanson, K. et al. (2016). "Machine-Learning-Assisted Materials Discovery Using Failed Experiments," Nature, vol. 533, no. 7601, pp. 73-76. https://doi.org/10.1038/nature17439

34. Kim, E., Huang, K., and Ramprasad, R. (2018). "Machine Learning in Materials Informatics: Recent Applications and Prospects," npj Computational Materials, vol. 4, p. 37. https://doi.org/10.1038/s41524-018-0090-9.