



जल से हरित हाइड्रोजन का उत्पादन: भविष्य की सतत ऊर्जा

कामना के. मिश्रा, प्रभाकर सिंह*

भौतिकी विभाग, भारतीय प्रौद्योगिकी संस्थान (बनारस हिंदू विश्वविद्यालय), वाराणसी, उत्तर प्रदेश, भारत- २२१००५

लेखक से संवाद के लिए ईमेल* - psingh.app@iitbhu.ac.in

आलेख प्राप्त: २१ अगस्त २०२६; अंतिम संशोधन: २३ सितम्बर २०२६; स्वीकृत: २३ सितम्बर २०२६

प्रथम ऑनलाइन प्रकाशित: २७ सितम्बर २०२६

सारांश

बढ़ते CO₂ उत्सर्जन और समाज पर उनके गहरे प्रभाव पर बढ़ती चिंता के साथ, यह आवश्यक हो गया है कि हम जीवाश्म ईंधन पर अपनी निर्भरता से स्वच्छ ऊर्जा की ओर बढ़ें जिसे नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों से प्राप्त किया जा सकता है। विभिन्न हाइड्रोजन उत्पादन तकनीकों में, नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों से प्राप्त विद्युत का उपयोग करके जल के विद्युत अपघटन द्वारा उत्पादित हरित हाइड्रोजन को इसकी उच्च ऊर्जा घनत्व तथा शून्य CO₂ उत्सर्जन के कारण सर्वोत्तम समाधान माना जाता है। जल इलेक्ट्रोलिसिस में, उत्प्रेरक का उपयोग कैथोड पर हाइड्रोजन इवोल्यूशन रिएक्शन (HER) और एनोड पर ऑक्सीजन इवोल्यूशन रिएक्शन (OER) के लिए किया जाता है ताकि इलेक्ट्रोड पर इलेक्ट्रोकेमिकल प्रतिक्रियाओं को तेज करके जल-विभाजन प्रक्रिया की दक्षता को बढ़ाया जा सके। यह लेख जल इलेक्ट्रोलाइजर (Water Electrolyzer) के मूलभूत सिद्धांतों तथा उसमें होने वाली प्रमुख प्रतिक्रियाओं का विस्तृत वर्णन करता है तथा इसके लाभों एवं सीमाओं पर भी प्रकाश डालता है। इसके अतिरिक्त, इसमें हमारे शोध समूह द्वारा किए गए कार्य को भी सम्मिलित किया गया है, जिसमें यूरिया-हाइड्रोलिसिस-सहायित हाइड्रोजनमल विधि द्वारा Ni₃TeO₆ उत्प्रेरकों का संश्लेषण किया गया तथा उसके पश्चात विभिन्न कैल्सिनेशन हीटिंग दरों (Calcination Ramp) पर उनका तापीय उपचार किया गया। इस अध्ययन में पहली बार ऊष्मीय रूप से प्रेरित जालकीय विकृति (Thermally Induced Lattice Strain) का Ni₃TeO₆ के संरचनात्मक, आकारिक, प्रकाशीय तथा विद्युत-उत्प्रेरकीय गुणों पर प्रभाव का अध्ययन किया गया, ताकि OER के प्रदर्शन में होने वाले सुधार को समझा जा सके। धीमी कैल्सिनेशन दर (1 °C/मिनट, NTO1) पर तैयार किए गए उत्प्रेरक में NiO₆ अष्टफलकीय (Octahedral) इकाइयों का निर्माण हुआ, जिनमें उच्च विकृति तथा न्यूनतम जालकीय विकृति पाई गई। परिणामस्वरूप, इस उत्प्रेरक ने उत्कृष्ट OER प्रदर्शन प्रदर्शित किया और 10 mA/cm² की धारा घनत्व पर केवल लगभग 345 mV का कम ओवरपोटेंशियल तथा लगभग 67.8 mV/dec का न्यूनतम टेफल ढाल (Tafel Slope) प्राप्त किया, जो अधिक जालकीय विकृति वाले अन्य तैयार उत्प्रेरकों की तुलना में बेहतर है। साथ ही, NTO1 ने 10 mA/cm² की धारा घनत्व पर 24 घंटे तक उत्कृष्ट स्थिरता प्रदर्शित की तथा लंबे समय तक अपनी आकारिकी को बनाए रखा। यह परिणाम OER की स्थिर-अवस्था परिस्थितियों में इस उत्प्रेरक की मजबूती एवं दीर्घकालिक स्थायित्व की पुष्टि करता है।

सूचक शब्द : उत्प्रेरक, ऑक्सीजन इवोल्यूशन रिएक्शन, हाइड्रोजन इवोल्यूशन रिएक्शन, जालकीय विकृति, हाइड्रोजनमल विधि



Producing Green Hydrogen from Water: The Future of Sustainable Energy

Kamana K. Mishra, Prabhakar Singh*

Department of Physics, Indian Institute of Technology-BHU, Varanasi, Uttar Pradesh, India – 221005

Corresponding Author Email*- psingh.app@iitbhu.ac.in

Received on: 21 August 2026; Final Revision: 23 September 2026; Accepted: 23 September 2026
Published Online First on: 27 September 2026

ABSTRACT

With growing concerns about increasing CO₂ emissions and their deep impact on society, it has become necessary to shift from our reliance on fossil fuels toward clean energy that can be sourced from renewable energy. Among various hydrogen production technologies, green hydrogen produced through water electrolysis using electricity from renewable energy sources is considered the best solution due to its high energy density and zero CO₂ emissions. In water electrolysis, electrocatalysts are used at the cathode for the hydrogen evolution reaction (HER) and at the anode for the oxygen evolution reaction (OER) to speed up the electrochemical reactions and enhance the efficiency of the water-splitting process. This article provides a detailed description of the basic principles of a water electrolyzer and the main processes that occur within it, while also highlighting its advantages and limitations. In addition, this also includes the work carried out by our research group, in which Ni₃TeO₆ catalysts were synthesized using a urea-hydrolysis-assisted hydrothermal method and subsequently subjected to thermal treatment at different calcination heating rates. In this study, for the first time, the effect of thermally induced lattice strain on the structural, morphological, optical, and electro-catalytic properties of Ni₃TeO₆ was investigated, in order to understand the improvements in oxygen evolution reaction (OER) performance. The catalyst prepared at a slow calcination rate (1 °C/min, NTO1) formed NiO₆ octahedral units, which exhibited high strain and minimal lattice distortion. As a result, this catalyst demonstrated excellent OER performance, achieving a low overpotential of only about 345 mV at a current density of 10 mA/cm² and a minimal Tafel slope of about 67.8 mV/dec, compared to other prepared catalysts with higher lattice distortion. Additionally, NTO1 showed excellent stability at a current density of 10 mA/cm² for 24 hours and maintained its morphology over a long time. This result confirms the robustness and long-term stability of this catalyst under steady-state OER conditions.

Keywords: Electrocatalyst, Oxygen evolution reaction, Hydrogen evolution reaction, Lattice strain, Hydrothermal process

लेखक परिचय

प्रोफेसर डॉ. प्रभाकर सिंह

प्रो. प्रभाकर सिंह वर्तमान में भारतीय प्रौद्योगिकी संस्थान (IIT), काशी हिंदू विश्वविद्यालय (BHU), वाराणसी में भौतिकी के प्रोफेसर के रूप में कार्यरत हैं तथा प्रतिष्ठित HAG स्केल पर प्रोफेसर के पद पर आसीन हैं। प्रो. सिंह ने म्यूनस्टर विश्वविद्यालय, जर्मनी से पीएच.डी. की उपाधि प्राप्त की है। IIT (BHU) में 2007 में शामिल होने से पहले उन्होंने उदय प्रताप कॉलेज, वाराणसी तथा इंदिरा गांधी राष्ट्रीय मुक्त विश्वविद्यालय (IGNOU), नई दिल्ली में सहायक प्रोफेसर के रूप में कार्य किया। उनका शोध मुख्यतः ऊर्जा अनुप्रयोगों हेतु उपयोगी पदार्थों के विकास, अभिलक्षण एवं अध्ययन पर केंद्रित है, जिसमें सोलिड ऑक्साइड फ्यूल सेल, सौर सेल, जल इलेक्ट्रोलिसिस तथा पीजोइलेक्ट्रिक/डाइइलेक्ट्रिक पदार्थ प्रमुख हैं। उन्होंने 185 से अधिक विशेषज्ञ-समीक्षित अंतरराष्ट्रीय शोध-पत्र प्रकाशित किए हैं। प्रो. सिंह ने 20 पीएच.डी. विद्यार्थियों, 19 मास्टर विद्यार्थियों तथा कई पोस्टडॉक्टोरल शोधकर्ताओं का मार्गदर्शन किया है। राष्ट्रीय एवं अंतरराष्ट्रीय स्तर पर उनके शोध योगदानों के लिए उन्हें कई पुरस्कार एवं फेलोशिप प्राप्त हुई हैं, जिनमें ग्लोबल स्टार अवार्ड (2021), ACerS ग्लोबल एंबेसडर अवार्ड (2023), जो अमेरिकन सिरैमिक सोसाइटी द्वारा प्रदान किए गए, ANRF की OVDF फेलोशिप (2025) तथा उनके संस्थान द्वारा प्रदान किया गया सर्वश्रेष्ठ शिक्षक पुरस्कार (2025) शामिल हैं। प्रो. सिंह ने IIT (BHU) में विभिन्न प्रशासनिक दायित्व भी निभाए हैं, जिनमें विभागाध्यक्ष, काउंसिल ऑफ वार्डन्स के अध्यक्ष, प्रशासनिक वार्डन, संयुक्त मुख्य प्रॉक्टर, प्रॉक्टर तथा स्टाफ स्पोर्ट्स टीम के प्रभारी प्रोफेसर शामिल हैं। IIT (BHU) से परे भी उनका शैक्षणिक नेतृत्व जारी है; वर्तमान में वे IIT पटना के बाह्य सीनेट सदस्य हैं। समग्र रूप से, प्रो. सिंह का शैक्षणिक जीवन नवीकरणीय ऊर्जा प्रौद्योगिकियों, शिक्षण, शोध तथा शैक्षणिक प्रशासन के क्षेत्र में महत्वपूर्ण योगदान को दर्शाता है।



कामना के. मिश्रा

कामना के. मिश्रा वर्तमान में भारतीय प्रौद्योगिकी संस्थान (IIT), काशी हिंदू विश्वविद्यालय (BHU), वाराणसी के भौतिकी विभाग में पीएच.डी. शोधार्थी हैं और प्रो. प्रभाकर सिंह के मार्गदर्शन में कार्य कर रही हैं। उन्होंने बिरला इंस्टीट्यूट ऑफ टेक्नोलॉजी, मेसरा, रांची से संघनित पदार्थ भौतिकी (Condensed Matter Physics) में विशेषज्ञता के साथ भौतिकी में एम.एससी. की उपाधि प्राप्त की है। उनका शोध मुख्यतः हरित हाइड्रोजन उत्पादन के लिए कम लागत वाले, नॉन-प्लैटिनम ग्रुप मेटल (non-PGM) विद्युत-उत्प्रेरकों के विकास पर केंद्रित है, विशेष रूप से ऑक्सीजन इवोल्यूशन रिएक्शन (OER) तथा ऐनायन एक्सचेंज मेम्ब्रेन वॉटर इलेक्ट्रोलाइजर (AEMWE) के लिए। अपने शोध के दौरान उन्होंने विद्युतरासायनिक अभिलक्षण, श्री-इलेक्ट्रोड प्रणालियों, जल इलेक्ट्रोलाइजर के संयोजन एवं परीक्षण, इन-सिटू/ऑपेरांडो रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी तथा विद्युतरासायनिक डेटा विश्लेषण में अनुभव प्राप्त किया है। उनकी शोध रुचियों में विद्युत-उत्प्रेरण, ऑपेरांडो अभिलक्षण तथा विद्युतरासायनिक ऊर्जा प्रौद्योगिकियाँ प्रमुख हैं। उनकी शोध के प्रति रुचि और उत्साह के कारण उन्हें प्रतिष्ठित NSTC-IIPP तथा NIMS-ICGP फेलोशिप प्राप्त हुई, जिनके माध्यम से उन्होंने क्रमशः CCU, ताइवान और NIMS, जापान में शोध प्रवास किया। उन्होंने कई विशेषज्ञ-समीक्षित शोध-पत्र तथा एक पुस्तक अध्याय प्रकाशित किया है और विभिन्न राष्ट्रीय एवं अंतरराष्ट्रीय वैज्ञानिक सम्मेलनों में अपने शोध कार्य प्रस्तुत किए हैं। इनमें अमेरिका में आयोजित 249वीं ECS बैठक तथा यूनाइटेड किंगडम के ऑक्सफोर्ड विश्वविद्यालय में आयोजित इलेक्ट्रोकेमिस्ट्री कार्यशाला शामिल हैं। अपने यूके शोध प्रवास के दौरान उन्होंने कैम्ब्रिज विश्वविद्यालय तथा Diamond Light Source सिंक्रोट्रॉन सुविधा का भी दौरा किया। उनकी शोध यात्रा विद्युतरासायनिक ऊर्जा प्रौद्योगिकियों में उनकी गहरी रुचि तथा हरित हाइड्रोजन उत्पादन के लिए टिकाऊ और प्रभावी तकनीकों के विकास के प्रति उनकी प्रतिबद्धता को दर्शाती है।



1. भूमिका

दुनिया भर में मानव आबादी की वैश्विक वृद्धि ने ऊर्जा की मांग को तेज कर दिया है। इस बढ़ती मांग को पूरा करना आज दुनिया की सबसे जरूरी चुनौतियों में से एक है। ऐतिहासिक रूप से, कोयला, तेल और प्राकृतिक गैस जैसे हाइड्रोकार्बन से प्राप्त जीवाश्म ईंधन, अपने उच्च ऊर्जा घनत्व और निष्कर्षण, परिवहन और शोधन के लिए अच्छी तरह से स्थापित बुनियादी ढांचे के कारण ऊर्जा के प्राथमिक स्रोत रहे हैं। हालांकि, ऊर्जा की मांग को पूरा करने के लिए जीवाश्म ईंधन पर वैश्विक निर्भरता के कारण CO₂ उत्सर्जन का स्तर बढ़ गया है। जीवाश्म ईंधन जलाने से सालाना लगभग 21.3 बिलियन टन CO₂ निकलती है, जिसका एक महत्वपूर्ण हिस्सा परिवहन क्षेत्र को जिम्मेदार ठहराया जाता है। पर्यावरण पर उनके हानिकारक प्रभाव और ग्रीनहाउस गैस (जीएचजी) उत्सर्जन के बारे में बढ़ती जागरूकता के कारण, हरित ऊर्जा के उत्पादन की दिशा में शोध करना अत्यावश्यक है।

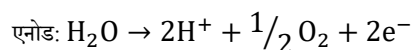
विभिन्न स्वच्छ ऊर्जा वाहकों में, हरित हाइड्रोजन सबसे आशाजनक विकल्पों में से एक के रूप में उभरा है। ऐसा इसलिए है क्योंकि हाइड्रोजन एक असाधारण रूप से उपयोगी और स्वच्छ ईंधन है जो जलाए जाने पर केवल जल वाष्प उत्पन्न करता है, कोई हानिकारक उत्सर्जन नहीं छोड़ता है और वायु प्रदूषण और ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन में कटौती करने की एक बड़ी क्षमता रखता है। इसके अलावा, यह एक अत्यधिक ज्वलनशील, रंगहीन और गंधहीन ईंधन है जिसे विभिन्न अनुप्रयोगों में नियोजित किया जा सकता है, जैसे कि आंतरिक दहन इंजन (आईसीई), रॉकेट इंजन और ईंधन सेला। इसके ऊर्जा घनत्व, जो गैसोलीन की तुलना में तीन गुना अधिक है, के कारण यह ऊर्जा भंडारण और बिजली उत्पादन के लिए अत्यधिक उपयोगी है। यह विभिन्न जैविक, प्रकाश संश्लेषक और रासायनिक विधियों में उपयोगी है। इसके अतिरिक्त, हाइड्रोजन एक उत्कृष्ट ऊर्जा भंडारण माध्यम के रूप में कार्य करता है क्योंकि इसे संग्रहीत किया जा सकता है और बाद में जब भी ऊर्जा की आवश्यकता है, बिजली में परिवर्तित किया जा सकता है। यह कम हवा या अपर्याप्त सौर विकिरण की अवधि के दौरान भी काम करता है।

हाइड्रोजन का उत्पादन करने के तीन मुख्य तरीके हैं: भाप मीथेन विधि, कोयला गैसीकरण और वाटर(जल) इलेक्ट्रोलिसिस। हालांकि पहली दो विधियाँ वर्तमान में वैश्विक हाइड्रोजन उत्पादन पर हावी हैं, क्योंकि वे जीवाश्म ईंधन पर अत्यधिक निर्भर हैं, लेकिन इसके परिणामस्वरूप CO₂ उत्सर्जन होता है। कार्बन-गहन विधियों के माध्यम से उत्पन्न हाइड्रोजन को "ग्रे हाइड्रोजन" कहा जाता है। CO₂ उत्सर्जन को कार्बन कैप्चर एंड स्टोरेज (CCS) या कार्बन कैप्चर, उपयोग और भंडारण (CCUS) के माध्यम से नियंत्रित किया जा सकता है; हालांकि, इन प्रक्रियाओं से उत्पादन लागत बढ़ती है और सख्त मीथेन उत्सर्जन नियंत्रण की आवश्यकता होती है, जिसे "ब्लू हाइड्रोजन" कहा जाता है। पर्यावरण के सबसे अनुकूल तरीके सौर, पवन, परमाणु ऊर्जा, या भूतापीय जैसे नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों द्वारा संचालित जल इलेक्ट्रोलिसिस विधि है। यह प्रक्रिया "ग्रीन हाइड्रोजन" उत्पन्न करती है, जो पूरी तरह से कार्बन-मुक्त है और टिकाऊ ऊर्जा समाधानों में योगदान देती है।[1]

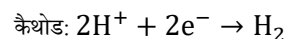
जल इलेक्ट्रोलिसिस एक ऐसी प्रक्रिया है जो पानी को हाइड्रोजन (H₂) और ऑक्सीजन (O₂) में विभाजित करने के लिए बिजली का उपयोग करती है। यह प्रक्रिया जल इलेक्ट्रोलाइजर में होता है, जो कि एक उपकरण जिसमें एक एनोड, एक कैथोड और इलेक्ट्रोलाइट होता है। जल इलेक्ट्रोलिसिस में दो रसायनिक प्रक्रियाएं शामिल हैं: एनोड पर ऑक्सीजन इवोल्यूशन रिएक्शन (OER) और कैथोड पर हाइड्रोजन इवोल्यूशन रिएक्शन (HER) होता है।[2]

जब इलेक्ट्रोड पर इलेक्ट्रिसिटी लगाया जाता है, तो एनोड पर, पानी के अणु इलेक्ट्रॉनों को खो देते हैं और सिस्टम के आधार पर ऑक्सीजन गैस और

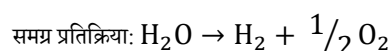
प्रोटॉन या हाइड्रॉक्साइड आयन बनाते हैं। ऑक्सीजन गैस उत्पन्न होती है, जैसा नीचे दिखाया गया है।



जबकि कैथोड पर, प्रोटॉन या हाइड्रॉक्साइड आयन इलेक्ट्रोलाइट के माध्यम से कैथोड तक यात्रा करते हैं। बाहरी सर्किट से इलेक्ट्रॉन प्रोटॉन के साथ मिलकर हाइड्रोजन गैस बनाते हैं।



हाइड्रोजन कैथोड पर एकत्रित होती है जिसका स्वच्छ ईंधन के रूप में उपयोग किया जाता है, और ऑक्सीजन को एनोड पर एकत्र किया जाता है, जिसको या तो बाहर निकाल दिया जाता है या अन्य प्रक्रियाओं में उपयोग किया जाता है।



OER इलेक्ट्रोकेमिकल अभिक्रियाओं के प्रदर्शन को बेहतर बनाने तथा औद्योगिक स्तर पर जल इलेक्ट्रोलिसिस उपकरणों के व्यापक निर्माण को सक्षम बनाने के लिए, हमारा समूह लागत-प्रभावी, पृथ्वी पर प्रचुर मात्रा में उपलब्ध तथा अत्यधिक टिकाऊ नॉन-नोबल मेटल उत्प्रेरकों के विकास पर निरंतर कार्य कर रहा है।[3]

इस लेख में हम इलेक्ट्रोलाइजर के कार्य करने के सिद्धांत और इसके विभिन्न प्रकारों पर चर्चा करते हैं। साथ ही, हम इस क्षेत्र में हमारे शोध समूह के योगदान का भी उल्लेख करते हैं, जिसमें उत्प्रेरक की गतिविधि और समग्र इलेक्ट्रोलाइजर दक्षता में सुधार पर किए गए कार्य शामिल हैं।

2. मुख्य भाग्य

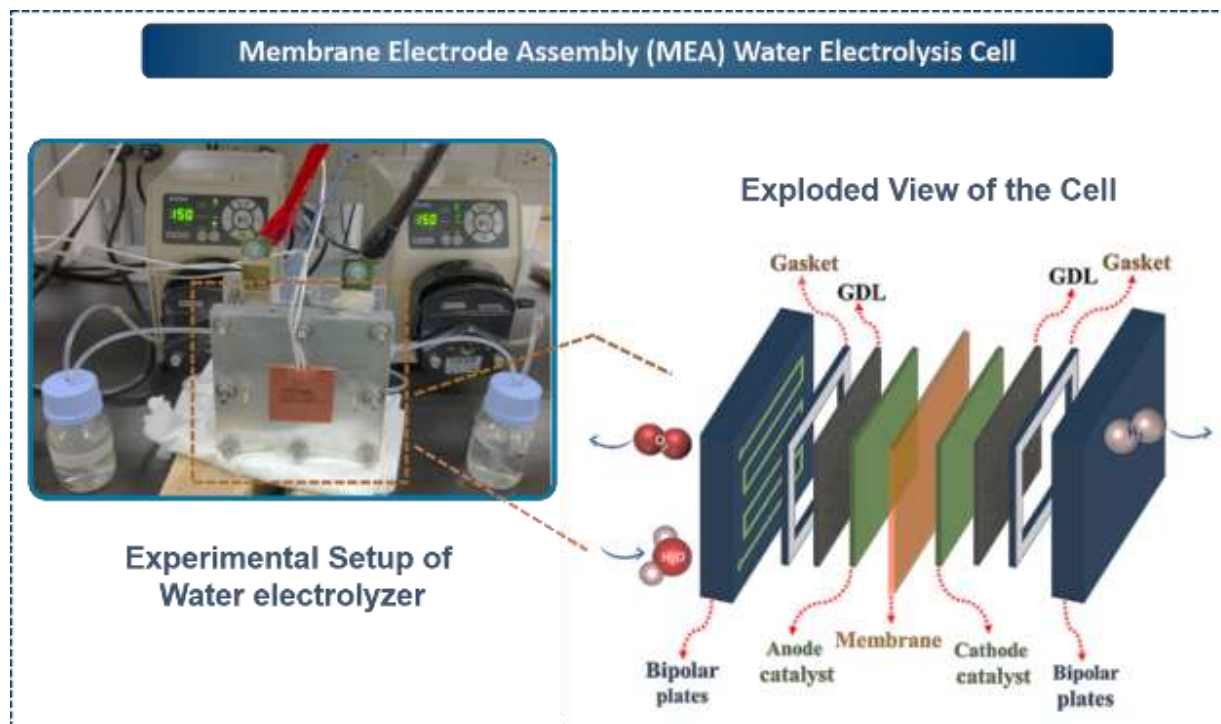
2.1 जल इलेक्ट्रोलिसिस का इतिहास:

जल इलेक्ट्रोलिसिस का इतिहास वैज्ञानिक जिज्ञासा और खोज की एक आकर्षक कहानी है जो दो शताब्दियों से भी अधिक पुरानी है। जल इलेक्ट्रोलिसिस की यात्रा 1789 में शुरू हुई, जब डच रसायन शास्त्री जैन रूडॉल्फ डेइमन (Jan Rudolph Deiman) तथा आद्रियान पैट्स वान ट्रूस्टवाइक (Adriaan Paets van Troostwijk) ने पहली बार पानी को हाइड्रोजन और ऑक्सीजन में विभाजित करने के लिए एक इलेक्ट्रोस्टैटिक जेनरेटर का उपयोग किया, जो रासायनिक परिवर्तन को चलाने के लिए बिजली की क्षमता की सबसे जल्द खोज को चिह्नित करता है।[1]

इलेक्ट्रोलिसिस का क्षेत्र 1800 में काफी उन्नत हुआ जब एलेसेंड्रो वोल्टा ने पहली वास्तविक बैटरी, वोल्टाइक पाइल का आविष्कार किया, जो एक स्थिर विद्युत प्रवाह प्रदान करने में सक्षम था। उनके अभूतपूर्व कार्य से पता चला कि बिजली, पानी को अपनी मौलिक गैसों में विघटित कर सकती है, यह एक मील का पत्थर साबित हुआ जिसने इलेक्ट्रोकेमिस्ट्री की नींव रखी। अगला बड़ा मील का पत्थर 1830 के दशक में माइकल फैराडे के अग्रणी कार्य के साथ आया। फैराडे ने इलेक्ट्रोलिसिस के मूलभूत सिद्धांतों की स्थापना की, जिसमें इलेक्ट्रोलिसिस के उनके दो नियम शामिल थे, जो मात्रात्मक रूप से किसी पदार्थ के माध्यम से पारित विद्युत प्रवाह की मात्रा को उत्पादित रासायनिक परिवर्तन की मात्रा से संबंधित करते थे। 1888 में, दिमित्री लाचिनोव ने पानी के इलेक्ट्रोलिसिस के माध्यम से हाइड्रोजन और ऑक्सीजन को औद्योगिक रूप से संश्लेषित करने के लिए एक तकनीक विकसित की। 1902 तक, 400 से अधिक औद्योगिक जल इलेक्ट्रोलाइजर पहले से ही सेवा

में थे। 10000 Nm³ H₂/h की क्षमता वाला पहला बड़ा जल इलेक्ट्रोलिसिस संयंत्र 1939 में सेवा में आया। समय के साथ, जल इलेक्ट्रोलिसिस स्वच्छ ऊर्जा अनुसंधान की आधारशिला बन गया है, विशेष रूप से हरित हाइड्रोजन के उत्पादन के लिए। आज, जल इलेक्ट्रोलिसिस टिकाऊ ऊर्जा प्रणालियों में परिवर्तन के वैश्विक प्रयासों के केंद्र में है। आधुनिक इलेक्ट्रोलाइजर उच्च दक्षता प्राप्त करने के लिए उन्नत उत्प्रेरक, मेम्ब्रेन (झिल्ली) और नवीकरणीय बिजली जैसे ऊर्जा स्रोतों का उपयोग करते हैं। डीमन और ट्रोस्टविज्क के साथ अपनी

कुशल शुरुआत से लेकर हरित हाइड्रोजन अर्थव्यवस्था में इसकी केंद्रीय भूमिका तक, जल इलेक्ट्रोलिसिस कई महान वैज्ञानिकों और इंजीनियरों के योगदान के माध्यम से विकसित हुआ है। यह अनुसंधान का एक जीवंत और आवश्यक क्षेत्र बना हुआ है, जो एक स्थायी ऊर्जा भविष्य की ओर प्रगति को आगे बढ़ाता है।[4]



चित्र 1: हाइड्रोजन उत्पादन के लिए उपयोग किया जाने वाला प्रयोगशाला-पैमाने पर एमईए जल इलेक्ट्रोलाइजर

2.2 इलेक्ट्रोलाइजर के प्रकार:

वर्तमान में, जल इलेक्ट्रोलिसिस तकनीक से हरित हाइड्रोजन उत्पन्न करने के चार अलग-अलग तरीके हैं। ये विधियां सिस्टम में आयनों (या आवेशित परमाणुओं) का संचालन करने के लिए उपयोग किए जाने वाले इलेक्ट्रोलाइट से भिन्न होती हैं। कुछ विधियां हाइड्रॉक्साइड आयनों (OH⁻) का उपयोग करती हैं, कुछ हाइड्रोजन आयनों (H⁺) का उपयोग करती हैं, और कुछ ऑक्सीजन आयनों (O₂⁻) का उपयोग करती हैं। वे हैं (i) अल्कलाइन वॉटर इलेक्ट्रोलिसिस (एडब्ल्यूई), (ii) सॉलिड ऑक्साइड वॉटर इलेक्ट्रोलिसिस (एसओईसी), (iii) प्रोटॉन-एक्सचेंज मेम्ब्रेन वॉटर इलेक्ट्रोलिसिस (पीईएमडब्ल्यूई), और (iv) ऐनायन-एक्सचेंज मेम्ब्रेन वॉटर इलेक्ट्रोलिसिस (ईईएमडब्ल्यूई)। इन इलेक्ट्रोलाइजर प्रणालियों की विस्तृत कार्यप्रणाली चित्र 2 में दिखाई गई है।[5]

2.2.1. अल्कलाइन वॉटर इलेक्ट्रोलाइजर (एडब्ल्यूई):

अल्कलाइन वॉटर इलेक्ट्रोलाइजर का उपयोग आमतौर पर बड़े पैमाने पर अनुप्रयोगों में हाइड्रोजन का उत्पादन करने के लिए किया जाता है। निकेल

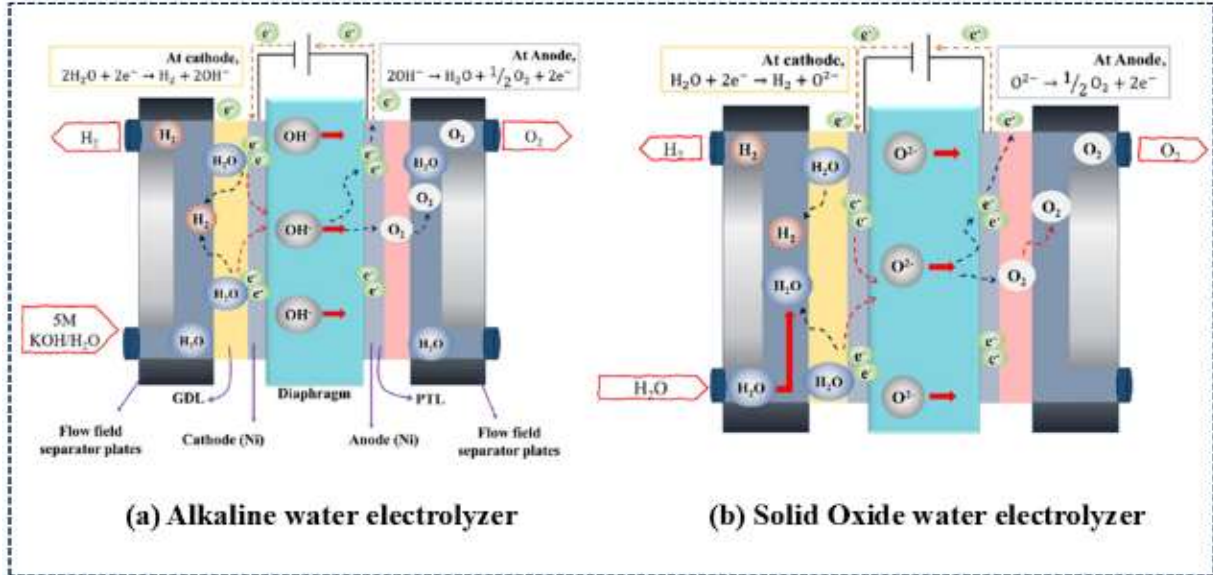
(Ni) और कोबाल्ट ऑक्साइड का उपयोग क्रमशः एनोड और कैथोड सामग्री बनाने के लिए किया जाता है। इसके अलावा, पोटेशियम हाइड्रॉक्साइड (KOH) इलेक्ट्रोलाइट सबसे अधिक उपयोग करने योग्य है और क्षारीयता दोनों इलेक्ट्रोड में इलेक्ट्रोलाइट को प्रसारित करके उत्पन्न होती है। चित्र (2 a) एक अल्कलाइन वॉटर इलेक्ट्रोलाइजर सेल का एक योजनाबद्ध आरेख दिखाता है। एनोड और कैथोड प्रतिक्रियाएं हाइड्रोजन और ऑक्सीजन का उत्पादन करने के लिए होती हैं। एक अर्ध पगाम्य डायफ्राम दो इलेक्ट्रोड के बीच स्थापित किया जाता है, जो हाइड्रॉक्साइड आयन (OH⁻) को पारित होने देते हैं। यह डायफ्राम एस्बेस्टस और पॉलिमर जैसे सिरमिक ऑक्साइड सामग्री से बने होते हैं। हाइड्रोजन और हाइड्रॉक्साइड, कैथोड पर 65-100 डिग्री सेल्सियस के मध्यम ऑपरेटिंग तापमान पर उत्पन्न होते हैं; ऑक्सीजन तब हाइड्रॉक्साइड प्रतिक्रिया द्वारा एनोड पर उत्पन्न होती है। क्षारीय जल इलेक्ट्रोलाइजर की रूपांतरण दक्षता 60-80% होती है, और सेल ऑपरेटिंग वोल्टेज 1.8-2.4 वोल्ट होता है। अल्कलाइन वॉटर इलेक्ट्रोलाइजर के फायदे यह हैं कि वे कम तापमान पर काम कर सकते हैं जिसमें हाइड्रोजन को सक्रिय करने और उत्पादन करने के लिए उत्प्रेरक की आवश्यकता नहीं होती है। इसके

विपरीत, अल्कलाइन इलेक्ट्रोलाइजर इलेक्ट्रोड क्षरण को क्षार समाधान की उपस्थिति के कारण सबसे महत्वपूर्ण चुनौती माना जाता है।[6]

2.2.2. सॉलिड ऑक्साइड वाटर इलेक्ट्रोलाइजर (एसओईसी):

सॉलिड ऑक्साइड वाटर इलेक्ट्रोलाइजर, अल्कलाइन और पीईएम इलेक्ट्रोलाइजर की तुलना में काफी अधिक तापमान पर काम करता है। इसका परिचालन तापमान 900-1000 °C होता है जबकि अल्कलाइन और

पीईएमडब्ल्यूई का परिचालन तापमान 70 -100 °C होता है। सेल इलेक्ट्रोड निकल (Ni) से बने होते हैं, और हाइड्रोजन पृथक्करण प्रक्रिया के लिए कम बिजली की आवश्यकता होती है, जिसे चित्र (2 b) में दिखाया गया है। विभिन्न ताप इनपुट स्रोतों, जैसे अपशिष्ट गर्मी और परमाणु ऊर्जा, का उपयोग हीटिंग के लिए बिजली पर निर्भरता को कम करने के लिए किया जा सकता है। इसके अलावा, उच्च ऑपरेटिंग तापमान के साथ सेल दक्षता बढ़ जाती है। दुर्भाग्य से, उच्च तापमान इलेक्ट्रोलाइट क्षरण की दर को भी बढ़ाता है और एसओईसी जीवनकाल को कम करता है। इसके अलावा, मौजूदा एसओईसी प्रदर्शन केवल किलोवाट पैमाने पर ही काम कर सकते हैं।



चित्र 2. (a) अल्कलाइन वॉटर इलेक्ट्रोलाइजर (b) सॉलिड ऑक्साइड वाटर इलेक्ट्रोलाइजर का योजनाबद्ध दृश्य [7]

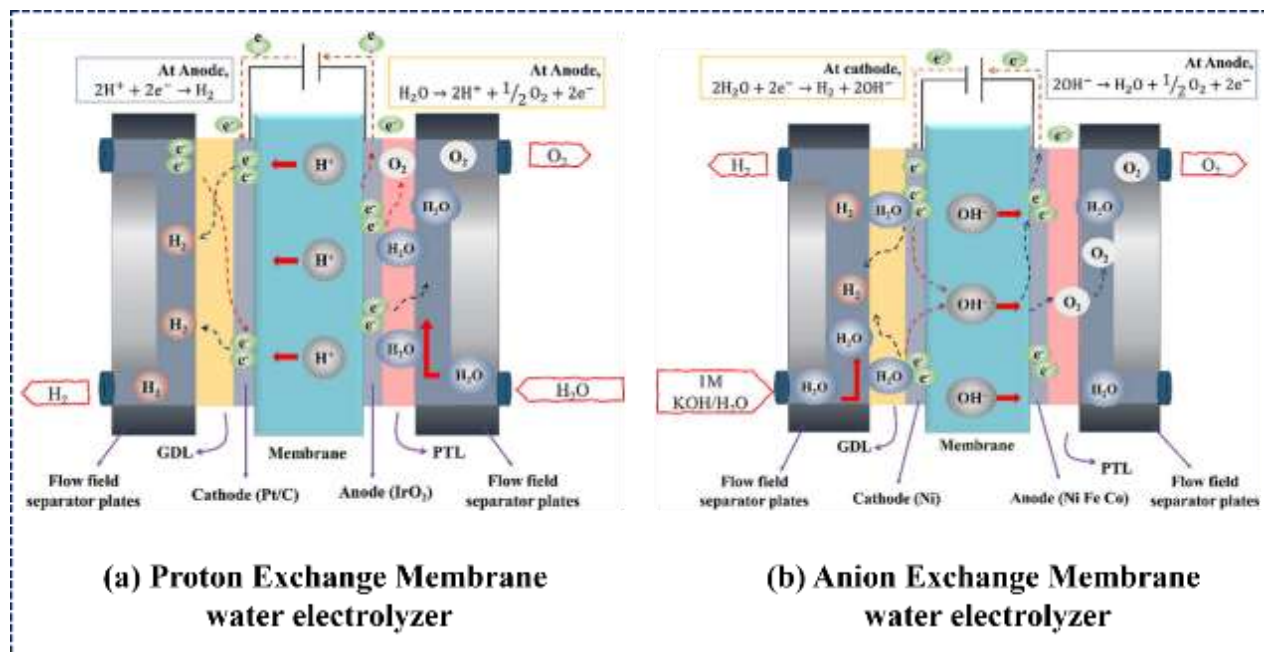
2.2.3. प्रोटॉन एक्सचेंज मेम्ब्रेन वॉटर इलेक्ट्रोलाइजर (पीईएमडब्ल्यूई):

पीईएम वॉटर इलेक्ट्रोलाइजर 70-90 डिग्री सेल्सियस के कम तापमान रेंज पर उच्च शुद्धता वाले हाइड्रोजन का उत्पादन कर सकते हैं। IrO₂ और Pt का उपयोग क्रमशः एनोड और कैथोड उत्प्रेरक सामग्री के रूप में किया जाता है। नेफियोन मेम्ब्रेन का उपयोग आमतौर पर हाइड्रोजन आयनों (H⁺) का संचालन करने के लिए किया जाता है; इसे एक ठोस इलेक्ट्रोलाइट के रूप में लागू किया जाता है, जो कि अल्कलाइन इलेक्ट्रोलाइजर में तरल इलेक्ट्रोलाइट के विपरीत होता है। एक पीईएम इलेक्ट्रोलाइजर सेल योजनाबद्ध आरेख और प्रतिक्रिया तंत्र चित्र (3 a) में दिखाया गया है। हाइड्रोजन आयन हाइड्रोजन अणुओं को बनाने के लिए मेम्ब्रेन के माध्यम से पलायन करते हैं। इलेक्ट्रोलाइट की अम्लीय प्रकृति और इलेक्ट्रोड की धातु सतहों के कारण, पीईएम इलेक्ट्रोलाइजर की प्रतिक्रिया कैनेटीक्स एक अल्कलाइन सेल की तुलना में तेजी से प्रेरित होती है। नतीजतन, पीईएम इलेक्ट्रोलाइजर सुरक्षित हैं और एनोड पक्ष पर वायुमंडलीय दबाव पर काम कर सकते हैं जबकि कैथोड पक्ष उच्च दबाव के संपर्क में है। पीईएम इलेक्ट्रोलाइजर की एक महत्वपूर्ण चुनौती बड़े पैमाने पर (मेगावाट) अनुप्रयोगों में होने वाली कठिनाई है। इसलिए, बड़े पैमाने पर इकाई की विशेषताओं और पीईएम इलेक्ट्रोलाइजर के अपेक्षित जीवनकाल को मान्य करने के लिए एक व्यापक विश्लेषण किया जाना चाहिए[8,9]।

2.2.4. एनायन एक्सचेंज मेम्ब्रेन वॉटर इलेक्ट्रोलाइजर (एईएमडब्ल्यूई):

पीईएमडब्ल्यूई की अम्लीय प्रकृति इलेक्ट्रोकेटलिस्ट की चुनाव को प्रतिबंधित करती है। क्योंकि केवल Pt समूह पीईएमडब्ल्यूई में इलेक्ट्रोड के रूप में उपयोग

के लिए स्वीकार्य है। यह पीईएमडब्ल्यूई को महंगा बनाता है और इसके बड़े पैमाने पर व्यावसायीकरण में बाधा डालता है। इन बाधाओं को एनायन-एक्सचेंज मेम्ब्रेन वॉटर इलेक्ट्रोलाइजर (एईएमडब्ल्यूई) के साथ संबोधित किया जा सकता है, जो अगली पीढ़ी की तकनीक के रूप में उभरा है। एनायन एक्सचेंज मेम्ब्रेन-आधारित जल इलेक्ट्रोलिसिस में अल्कलाइन और पीईएम जल इलेक्ट्रोलिसिस का संयुक्त प्रभाव होता है। इसके अलावा, एईएम सेल गैर-उत्कृष्ट उत्प्रेरक सामग्री का उपयोग करता है, जो हाइड्रोजन के उत्पादन की लागत को कम करता है। गैर-उत्कृष्ट उत्प्रेरकों के उपयोग के कारण, एईएम जल इलेक्ट्रोलिसिस तकनीक कई शोधकर्ताओं का वर्तमान फोकस बन गई है। चित्र (3 b) दिखाता है कि कैसे एक एनायन एक्सचेंज मेम्ब्रेन (एईएम) OH⁻ आयनों का संचालन करके H₂ और O₂ को अलग करती है। कम तापमान वाली एईएमडब्ल्यूई प्रणाली दो अर्ध-सेल प्रतिक्रियाओं के माध्यम से संचालित होती है: कैथोड पर HER और एनोड पर OER। कैथोड पर जल (पानी) के अणुओं का अपचयन होता है, जिससे हाइड्रोजन गैस (H₂) तथा हाइड्रॉक्साइड आयन (OH⁻) उत्पन्न होते हैं। ये हाइड्रॉक्साइड आयन ऋणायन विनिमय मेम्ब्रेन के माध्यम से धनात्मक आवेशित एनोड की ओर प्रवाहित होते हैं। एनोड पर इन हाइड्रॉक्साइड आयनों का ऑक्सीकरण होता है, जिससे ऑक्सीजन गैस (O₂), जल तथा इलेक्ट्रॉन उत्पन्न होते हैं। इस ऑक्सीकरण के दौरान मुक्त हुए इलेक्ट्रॉन बाहरी परिपथ से होकर पुनः कैथोड तक पहुँचते हैं, जिससे विद्युत परिपथ पूर्ण हो जाता है। इस व्यवस्था के कारण कैथोड पर उत्पन्न हाइड्रोजन तथा एनोड पर उत्पन्न ऑक्सीजन को अलग-अलग एकत्र किया जा सकता है, जिससे अभिक्रिया कक्ष के भीतर दोनों गैसों का मिश्रण नहीं होता। कुशल आयन परिवहन और उत्प्रेरक कणों के बीच बेहतर बंधन सुनिश्चित करने के लिए, कण-आधारित उत्प्रेरक परतों का निर्माण



चित्र 3. (a) प्रोटॉन एक्सचेंज मेम्ब्रेन वाटर इलेक्ट्रोलाइजर (b) ऐनयान एक्सचेंज मेम्ब्रेन वाटर इलेक्ट्रोलाइजर का योजनाबद्ध दृश्य [7]

ऋणायन विनिमय आयनोमर का उपयोग करके किया जाता है, जो उत्प्रेरक कणों को बांधते हैं और उत्प्रेरक परत के माध्यम से OH⁻ आयनों का संचालन करते हैं। आईएमडब्ल्यूई के समग्र कार्य सिद्धांत को आम तौर पर एक योजनाबद्ध प्रतिनिधित्व के साथ चित्र 3 b में चित्रित किया गया है। [7]

2.3. प्रायोगिक विश्लेषण:

कैल्सिनेशन की रैम्प दर (ramp rate) एक महत्वपूर्ण पैरामीटर है, जो इलेक्ट्रॉनिक बैंड संरचना तथा क्रिस्टल संरचना के मापदंडों को प्रभावित कर सकती है, जिसके परिणामस्वरूप जालक विकृति (lattice strain) उत्पन्न हो सकता है। उदाहरण के लिए, Sun et al. ने बताया कि 400 °C पर कैल्सिनेट किए गए IrO₂ में अधिकतम जालक विकृति पाया गया, जिसके परिणामस्वरूप उच्च OER गतिविधि प्राप्त हुई। इस नमूने में सबसे कम ओवरपोटेंशियल (63 mV) तथा सबसे कम charge transfer resistance भी देखा गया। [10]। यह परिणाम दर्शाता है कि कैल्सिनेशन तापमान में परिवर्तन से उत्पन्न लैटिस स्ट्रेन OER प्रक्रिया में दर-निर्धारक चरण की भूमिका निभा सकता है। अतः, उत्प्रेरक की OER गतिविधि पर कैल्सिनेशन रैम्प द्वारा नियंत्रित लैटिस स्ट्रेन की भूमिका को समझना आवश्यक है।

हाल ही में, उत्प्रेरक पर तापीय रूप से प्रेरित जालक विकृति (thermally induced lattice strain) के संरचनात्मक, रूपात्मक, प्रकाशीय तथा इलेक्ट्रोकेटलिटिक गुणों पर प्रभाव का अध्ययन करने और इसके माध्यम से बेहतर ऑक्सीजन इवोल्यूशन रिएक्शन (OER) गतिविधि प्राप्त करने के लिए, हमने Ni₃TeO₆ (NTO) उत्प्रेरकों का संश्लेषण यूरिया हाइड्रोथर्मल-सहायित हाइड्रोथर्मल विधि द्वारा किया। [3]। इसके पश्चात, विभिन्न हीटिंग रेट पर पोस्ट-सिंथेसिस कैल्सिनेशन किया गया। धीमी कैल्सिनेशन दर (1 °C/मिनट, NTO1) पर तैयार किए गए उत्प्रेरक में अत्यधिक विकृत NiO₆ ऑक्टाहेड्रल इकाई तथा न्यूनतम लैटिस विकृति का निर्माण हुआ। इस उत्प्रेरक ने उत्कृष्ट OER प्रदर्शन प्रदर्शित किया, जिसमें 10 mA/cm² की धारा घनत्व

पर लगभग 345 mV का कम ओवरपोटेंशियल तथा लगभग 67.8 mV/dec का न्यूनतम टेफल ढाल प्राप्त हुआ, जो अधिक लैटिस विकृति वाले अन्य उत्प्रेरकों की तुलना में बेहतर है। इसके अतिरिक्त, NTO1 ने 10 mA/cm² की धारा घनत्व पर 24 घंटे तक स्थिर प्रदर्शन बनाए रखा तथा लंबे समय तक अपनी आकृति को भी सुरक्षित रखा। यह परिणाम OER के दौरान स्थिर अवस्था में इसकी उत्कृष्ट स्थायित्व (Stability) एवं टिकाऊपन (Durability) को प्रमाणित करता है।

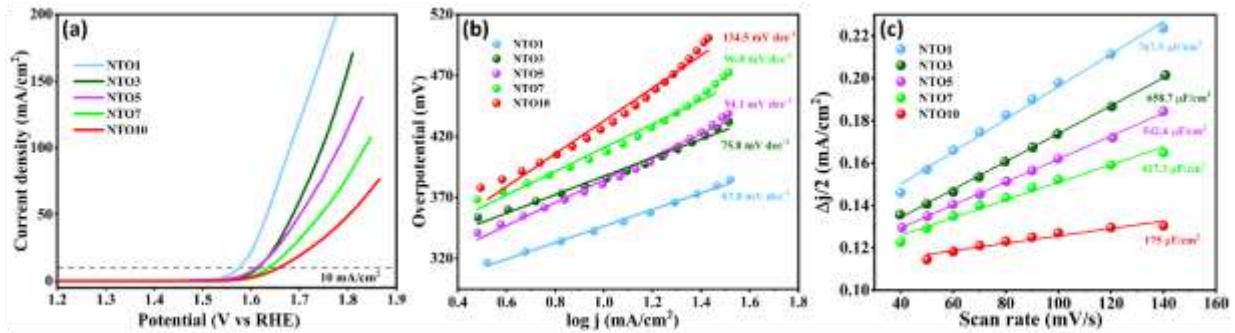
2.4. विद्युतरासायनिक उत्प्रेरकों का संश्लेषण:

सामान्य संश्लेषण प्रक्रिया में, 1 mmol Ni (NO₃)₂·6H₂O को परिवेशीय परिस्थितियों में 30 mL डीआयोनाइज्ड (DI) जल में पूर्णतः घोल लिया गया। इसके पश्चात, 0.33 mmol H₆O₆Te तथा 1 mmol यूरिया पाउडर को 30 mL DI जल में घोला गया। तैयार दोनों विलयनों को आपस में मिलाया गया तथा 2 M NaOH जलीय विलयन का उपयोग करके मिश्रण का pH 7 किया गया। इसके बाद, तैयार विलयन को 100 mL क्षमता वाले टेफ्लॉन-लाइन वाले ऑटोक्लेव में स्थानांतरित किया गया और 180 °C पर 12 घंटे तक गर्म किया गया। ऑटोक्लेव को प्राकृतिक रूप से कमरे के तापमान तक ठंडा होने के बाद, अभिक्रिया से प्राप्त उत्पाद को अपकेंद्रण (centrifugation) द्वारा अलग किया गया। इसके बाद अशुद्धियों को हटाने के लिए प्राप्त उत्पाद को DI जल और एथेनॉल से कम से कम तीन बार धोया गया तथा रातभर सुखाया गया। इसके पश्चात, प्राप्त सूखे पाउडर को 600 °C पर 2 घंटे तक कैल्सिनेशन किया गया, जिससे शुद्ध एवं क्रिस्टलीय Ni₃TeO₆ (NTO) चरण प्राप्त हुआ। कैल्सिनेशन विभिन्न तापमान वृद्धि दरों (ramp rates) पर किया गया, अर्थात् 1, 3, 5, 7 और 10 °C प्रति मिनट। इनसे प्राप्त कैल्सिनेटेड NTO पाउडरों को क्रमशः NTO1, NTO3, NTO5, NTO7 और NTO10 नाम दिया गया।

2.5. विद्युत रासायनिक (इलेक्ट्रोकेमिकल) माप:

सभी विद्युत-रासायनिक मापनों को सामान्य परिस्थितियों में नोवा सॉफ्टवेयर से सुसज्जित मेट्रोहम ऑटोलैब विद्युत-रासायनिक वर्कस्टेशन का उपयोग करते हुए तीन-इलेक्ट्रोड कॉन्फिगरेशन में किया गया। इस सिस्टम में एक Ag/AgCl ग्लासी रोड (जो 3M KCl सॉल्यूशन से संतृप्त है) को संदर्भ इलेक्ट्रोड के रूप में, Pt तार को काउंटर इलेक्ट्रोड के रूप में, चालकता सबस्ट्रेट पर डिपोजिट किया गया उत्प्रेरक स्याही कार्य इलेक्ट्रोड के रूप में और 1M KOH सॉल्यूशन को इलेक्ट्रोलाइट के रूप में शामिल किया गया

है। तापन के साथ संभावित विचलन को कम करने के लिए, इलेक्ट्रोलाइट को संदर्भ इलेक्ट्रोड से जोड़ने के लिए KCl और अगर-अगर से भरा हुआ लुगिन कैपिलरी उपयोग किया गया। उत्प्रेरक स्याही को तैयार करने के लिए 10 mg NTO को 120 μ l आइसोप्रोपाइल अल्कोहल और 5 μ l 5% नेफियन के साथ कुछ घंटों तक लगातार हिलाते हुए घोल में निलंबित किया गया। इसके बाद, तैयार स्याही को सावधानीपूर्वक निकल फोम पर ड्रॉप-कास्ट किया गया और वैक्यूम ओवन में सुखाया गया।



चित्र 4. (a) 1 mV/s की स्कैन दर पर एक क्षारीय माध्यम (1 M KOH) में सभी तैयार उत्प्रेरकों के एलएसवी वक्र। (b) टेफल प्लॉट (c) विद्युत द्विस्तरीय धारिता (Cdl) प्लॉट [3]

सभी तैयार किए गए उत्प्रेरकों का लीनियर स्वीप वोल्टैमेट्री (LSV) न्यूनतम स्कैन दर (~1 mV/s) पर सामान्य परिस्थितियों में किया गया। टेफल ढाल प्रतिक्रिया गति और बेहतर उत्प्रेरक गतिविधि को मापने का एक पैरामीटर है, जिसे ओवरपोटेंशियल (vs RHE) और धारा घनत्व (mA/cm²) के लघुगणक के ग्राफ की ढलान से निकाला जा सकता है। इस रैखिक प्लॉट को टेफल समीकरण के साथ फिट किया गया: $\eta = b \log j + a$, जहाँ η ओवरपोटेंशियल को दर्शाता है, b टेफल ढाल है, a इंटरसेप्ट है, और j धारा घनत्व को दर्शाता है [11,12]

इलेक्ट्रोड-इलेक्ट्रोलाइट सतह पर विद्युत द्विस्तरीय धारिता (डबल लेयर कैपेसिटेंस (Cdl)) और उत्प्रेरक की इलेक्ट्रोकेमिकली एक्टिव सरफेस एरिया (ECSA) निर्धारित करने के लिए, विभिन्न स्कैन दरों पर गैर-फैराडिक क्षेत्रों में साइक्लिक वोल्टमेट्री (CV) रिकॉर्ड किया गया। सभी उत्प्रेरकों की स्थिरता और टिकाऊपन का मूल्यांकन उच्च स्कैन (100 mV/s) पर 500 चक्र के लिए CV रिकॉर्ड करके किया गया और स्थिरता की पुष्टि क्रोनोएम्पेरोमेट्री, क्रोनोपोटेंशियोमेट्री और मल्टीस्टेप क्रोनोपोटेंशियोमेट्री मापों द्वारा भी की गई। सभी इलेक्ट्रोकेमिकल मापन नोवा सॉफ्टवेयर का उपयोग करके किए गए।

स्थिर लगाए गये विभव सीमा (V vs Ag/AgCl) में लिए गए सभी LSV और CV मापों को निम्नलिखित संबंध का उपयोग करके रिवर्सिबल हाइड्रोजन इलेक्ट्रोड (RHE) में बदला गया।

$$E_{\text{RHE}} = E_{\text{Ag/AgCl}} + 0.197 + 0.059 \times \text{pH}$$

जहाँ Ag/AgCl की मानक क्षमता 0.197 V है।

निम्नलिखित संबंध का उपयोग ओवरपोटेंशियल (η) की गणना करने के लिए किया गया-

$$\eta = E_{\text{RHE}} - 1.23 \text{ V}$$

2.6. विद्युत रासायनिक विश्लेषण परिणाम:

सभी तैयार किए गए उत्प्रेरकों की इलेक्ट्रोड-इलेक्ट्रोलाइट इंटरफेस पर अभिक्रिया गतिकी के बारे में जानकारी प्राप्त करने के लिए, iR-सुधारित LSV वक्रों से प्राप्त NTO1, NTO3, NTO5, NTO7 और NTO10 के टेफल प्लॉटों का विश्लेषण किया गया, जैसा कि चित्र 4b में दर्शाया गया है। NTO1 का टेफल ढाल सबसे कम ~67.8 mV/dec पाया गया, जबकि NTO3, NTO5, NTO7 और NTO10 के टेफल ढाल क्रमशः ~75.8 mV/dec, ~94.1 mV/dec, ~96.8 mV/dec और ~134.5 mV/dec रहे। टेफल ढाल आवेश स्थानांतरण गुणांक के साथ व्युत्क्रमानुपाती रूप से संबंधित होता है, जो अन्य उत्प्रेरकों की तुलना में NTO1 में तीव्र इलेक्ट्रॉन स्थानांतरण गतिकी तथा बेहतर OER गतिविधि को दर्शाता है।

इसके बाद, उत्प्रेरक के एक आंतरिक गुण के रूप में इलेक्ट्रोकेमिकली एक्टिव सरफेस एरिया (ECSA) का अध्ययन किया गया, ताकि OER में प्रत्यक्ष रूप से शामिल उत्प्रेरक के सक्रिय सतह क्षेत्र का मूल्यांकन किया जा सके। ECSA और विद्युत द्विस्तरीय धारिता (Cdl) के बीच संबंध निम्नलिखित समीकरण द्वारा दिया जाता है।

$$ECSA = \frac{C_{dl} \times S}{C_s}$$

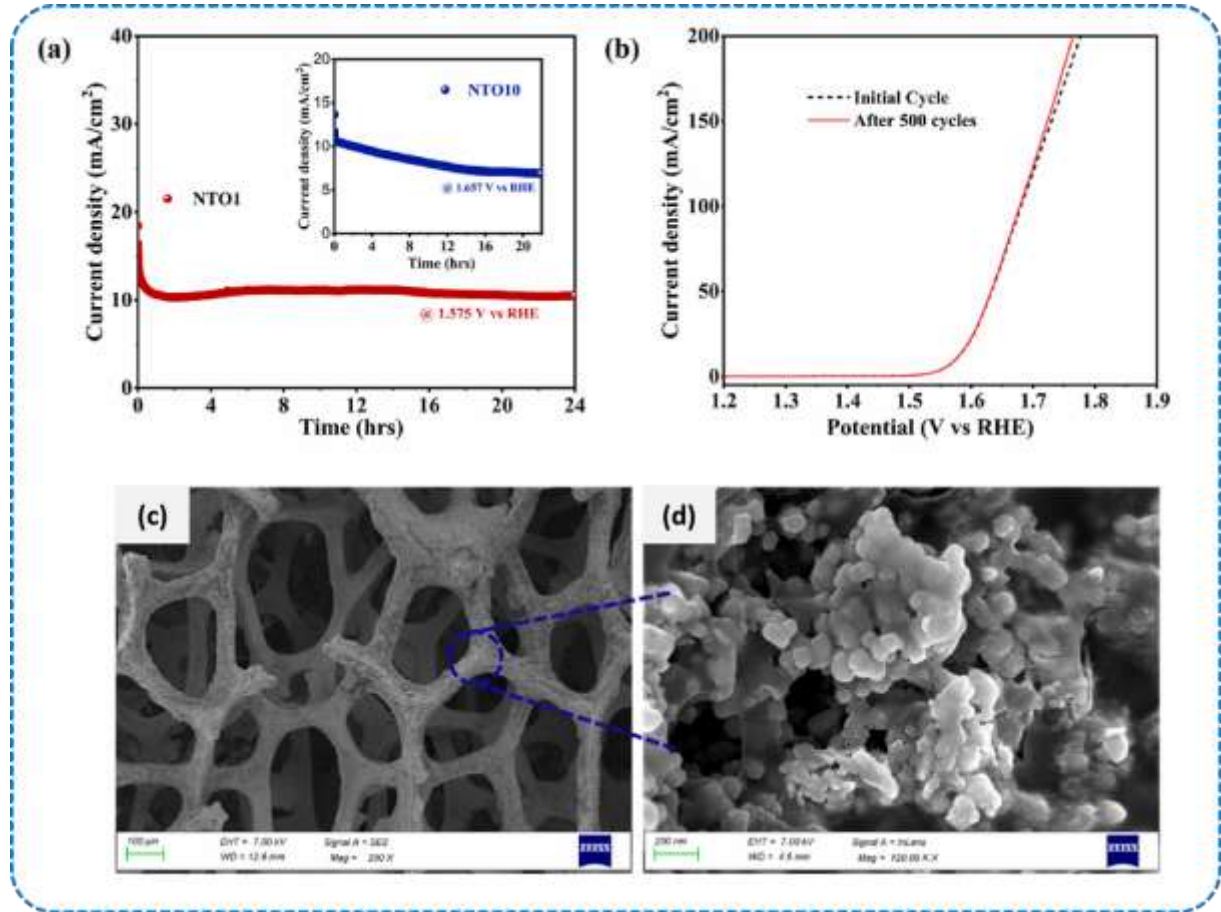
जहाँ C_s समतल सतह की विशिष्ट धारिता (specific capacitance) है। क्षारीय माध्यम में समतल सतहों के लिए धारिता (C_s) सामान्यतः 20–60 μ F/cm² के बीच होती है। इस अध्ययन में $C_s = 40 \mu$ F/cm² का मान चुना गया, जो विभिन्न मेटल ऑक्साइडों के लिए पहले प्रकाशित मानों के अनुरूप है। S कार्यशील इलेक्ट्रोड का ज्यामितीय सतह क्षेत्र है, जिसका मान 1.0 cm² है [13–15]

वहीं, CdI को सभी तैयार किए गए उत्प्रेरकों के लिए विभिन्न स्कैन दरों पर गैर-फैराडिक क्षेत्र में CV रिकॉर्ड करके प्राप्त किया गया। गैर-फैराडिक क्षेत्र के भीतर एक निश्चित विभव सीमा पर, संधारित्र धारा और स्कैन दर के बीच प्लॉट की ढाल CdI का उचित अनुमान प्रदान करती है, जैसा कि चित्र 4 c में दर्शाया गया है। संधारित्र धारा को एनोडिक और कैथोडिक धाराओं के निरपेक्ष मानों के औसत के रूप में निर्धारित किया गया।

गणना किए गए ECSA मान NTO1, NTO3, NTO5, NTO7 और NTO10 के लिए क्रमशः $\sim 19.19 \text{ cm}^2$, $\sim 16.47 \text{ cm}^2$, $\sim 13.56 \text{ cm}^2$, $\sim 10.43 \text{ cm}^2$ और $\sim 4.37 \text{ cm}^2$ पाए गए। NTO1 का सबसे अधिक ECSA मान यह दर्शाता है कि इसकी अधिक सतह परमाणु अथवा सक्रिय साइटों इलेक्ट्रोलाइट के संपर्क में उपलब्ध हैं, जिससे अभिकारकों (जैसे क्षारीय

माध्यम में OH^-) के साथ अधिक प्रभावी अंतःक्रिया संभव होती है और OER प्रदर्शन में सुधार होता है।

यह अवलोकन स्पष्ट करता है कि OER प्रदर्शन में वृद्धि केवल ECSA के बढ़ने के कारण नहीं है, बल्कि ऑक्सीजन रिक्तियों (Oxygen Vacancies) से समृद्ध संरचनात्मक विन्यास द्वारा उत्पन्न उत्प्रेरक की बेहतर आंतरिक सक्रियता (Intrinsic Activity) का भी महत्वपूर्ण योगदान है। यह ऑक्सीजन-रिक्तियों से युक्त संरचना OER की धीमी अभिक्रिया गतिकी (Sluggish Reaction Kinetics) को प्रभावी रूप से तेज करती है, जिसके परिणामस्वरूप उत्प्रेरकीय प्रदर्शन में उल्लेखनीय सुधार होता है।



चित्र 5. (a) NTO1 और NTO10 का क्रोनेम्पेरोमेट्री वक्र (b) 100 mV/sec पर सीवी के 500 चक्रों के बाद NTO1 का एलएसवी स्थिरता वक्र (c) और (d) पोस्ट-OER NTO1 इलेक्ट्रोड की एफई-एसईएम छवियां [3]

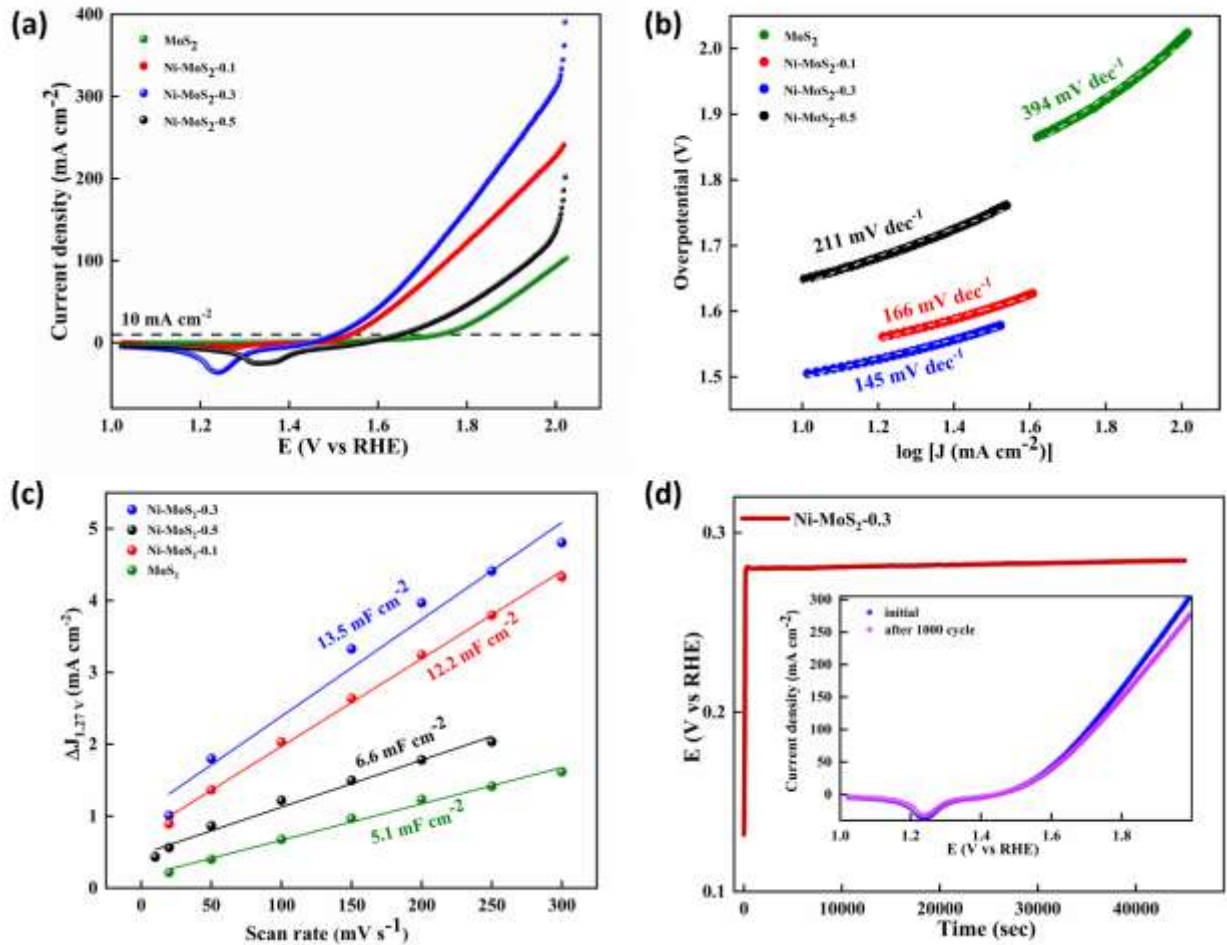
3. स्थिरता और स्थायित्व विश्लेषण:

इसके अलावा, लंबे समय तक क्रोनेम्पेरोमेट्रिक मापों ने दिखाया कि NTO1 ने 1.575 V vs RHE पर 24 घंटे तक लगभग 10 mA cm^{-2} का स्थिर धारा घनत्व बनाए रखा, जबकि NTO10 में धारा घनत्व धीरे-धीरे कम होता गया। इसके अलावा, NTO1 ने 500 CV साइकिलों के बाद ओवरपोटेंशियल में केवल मामूली बदलाव के साथ अपना इलेक्ट्रोकेमिकल प्रदर्शन बनाए रखा,। NTO1 (चित्र 5 c और 5 d) की OER FE-SEM छवियों से पता चलता है कि लंबे समय तक संचालन के बाद भी उत्प्रेरक की रूपरेखा ज्यादातर अपरिवर्तित रही, जो इसकी उत्कृष्ट संरचनात्मक और रूपात्मक स्थिरता की पुष्टि करता है।[3]

हमने $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{MoS}_2$ हेटेरोस्ट्रक्चर का भी अध्ययन किया, जिसमें Ni के विभिन्न मोलर अनुपातों का उपयोग किया गया और इसे हाइड्रोथर्मल विधि द्वारा सफलतापूर्वक संश्लेषित किया गया। इस दृष्टिकोण का उद्देश्य शुद्ध MoS_2 की सीमाओं, विशेष रूप से इसकी कम आंतरिक गतिविधि और सीमित संख्या में सक्रिय साइटों, को दूर करना था। संश्लेषित सामग्रियों की संरचनात्मक एवं रूपात्मक विशेषताओं का अध्ययन किया गया, जिससे उनके गुणों के बारे में महत्वपूर्ण जानकारी प्राप्त हुई। Ni के समावेशन से इलेक्ट्रॉनिक संरचना में परिवर्तन होने तथा HER और OER दोनों के लिए सक्रिय साइटों की संख्या में उल्लेखनीय वृद्धि होने की संभावना थी। विशेष

रूप से, Ni_3S_2 के समावेशन से विद्युत चालकता में वृद्धि तथा हेटेरोस्ट्रक्चर इंटरफेस पर सहक्रियात्मक अंतःक्रियाओं (synergistic interactions) को

बढ़ावा मिलने की अपेक्षा की गई, जिससे HER और OER दोनों की अभिक्रिया गतिकी में सुधार हो सके [16,17]



चित्र 6. (a) सभी तैयार किए गए उत्प्रेरकों की LSV वक्रें क्षारीय माध्यम (1M KOH) में 5 mV/सेकंड की स्कैन दर पर (b) टैफल प्लॉट्स (ओवरपोटेंशियल बनाम करंट डेंसिटी का लॉगरिदम), (c) विद्युत द्विस्तरीय धारिता (Cdl) प्लॉट्स, (d) Ni-MoS₂-0.3 की क्रोनोपोटेंशियोमेट्री वक्र, जो 1M KOH अत्यधिक क्षारीय माध्यम में 10 mA/cm² पर रिकॉर्ड की गई; इनसेट- Ni-MoS₂-0.3 की LSV स्थिरता वक्र 1000 CV साइकल्स के बाद 50 mV/सेकंड पर. [16]

इलेक्ट्रोकेमिकल मापनों से पता चला कि Ni-MoS₂-0.3 कंपोजिट ने उत्कृष्ट द्विकार्यात्मक (bifunctional) गतिविधि प्रदर्शित की। इसने 10 mA cm⁻² की धारा घनत्व पर HER के लिए 74 mV तथा OER के लिए 260 mV का ओवरपोटेंशियल प्राप्त किया जैसा कि चित्र 6 (a) में दिखाया गया है। अनुकूल अभिक्रिया गतिकी का संकेत क्रमशः HER और OER के लिए 131 mV dec⁻¹ तथा 145 mV dec⁻¹ के निम्न टैफल ढालों से मिला (चित्र 6 ब)।

इसके अतिरिक्त, Ni-MoS₂-0.3 कंपोजिट ने 1000 इलेक्ट्रोकेमिकल चक्रों के दौरान उत्कृष्ट दीर्घकालिक स्थिरता प्रदर्शित की (चित्र 6 d)। ये समग्र परिणाम दर्शाते हैं कि MoS₂ में Ni का समावेशन उसकी उत्प्रेरक गतिविधि को प्रभावी रूप से बढ़ाता है, जिससे यह कुशल जल विभाजन के लिए एक

अत्यंत आशाजनक द्विकार्यात्मक उत्प्रेरक के रूप में प्रस्तुत होता है [16,17]

4. उपसंहार

एक सतत ऊर्जा भविष्य के लिए, हरित हाइड्रोजन प्रौद्योगिकियों का विकास और उनका व्यापक उपयोग अत्यंत आवश्यक है। प्रोटॉन एक्सचेंज मेम्ब्रेन वॉटर इलेक्ट्रोलिसिस (पीईएमडब्ल्यूई) सबसे आशाजनक समाधानों में से एक है, जो कई विशिष्ट लाभ प्रदान करता है। इन लाभों के बावजूद, विशेष रूप से लागत, टिकाऊपन और स्केलेबिलिटी से संबंधित कई चुनौतियाँ अभी भी चिंता का विषय बनी हुई हैं। इसी के साथ, ऐनयान एक्सचेंज मेम्ब्रेन वॉटर इलेक्ट्रोलाइजर (ईईएमडब्ल्यूई), जो अगली पीढ़ी की एक प्रौद्योगिकी है और पृथ्वी पर प्रचुर मात्रा में उपलब्ध सामग्रियों तथा गैर-संक्षारक इलेक्ट्रोलाइट्स के उपयोग के कारण कम पूंजीगत लागत का वादा करती है, भी तेजी से ध्यान आकर्षित कर रही है। हालांकि, ईईएमडब्ल्यूई में अभी भी टिकाऊपन से संबंधित समस्याएँ हैं, विशेष रूप से उच्च pH परिस्थितियों में मेम्ब्रेन की

स्थिरता एक प्रमुख चुनौती है। कुल मिलाकर, तकनीकी परिपक्वता और विश्वसनीयता के कारण पीईएमडब्ल्यूई तत्काल व्यावसायीकरण के लिए सबसे आशाजनक विकल्प बना हुआ है। फिर भी, हरित हाइड्रोजन अर्थव्यवस्था में अपनी पूर्ण क्षमता प्राप्त करने के लिए पीईएमडब्ल्यूई और एईएमडब्ल्यूई दोनों में सामग्री नवाचार, प्रणाली एकीकरण और लागत में कमी की रणनीतियों पर केंद्रित प्रयासों की आवश्यकता है।

इसलिए, हमारा शोध कम लागत वाले मेटल उत्प्रेरकों के विकास पर केंद्रित है, जो इंटरफेसियल प्रतिरोध को कम कर सकें और दीर्घकालिक प्रदर्शन को बेहतर बना सकें। प्रयोगात्मक रूप से, हमने कैल्सिनेशन रैंप द्वारा नियंत्रित जालक विकृति (lattice strain) के Ni_3TeO_6 उत्प्रेरक की संरचनात्मक, रूपात्मक और OER गतिविधियों पर प्रभाव को प्रदर्शित किया है। Ni_3TeO_6 उत्प्रेरक का संश्लेषण यूरिया-सहायित हाइड्रोथर्मल विधि द्वारा किया गया। NTO1 ने सबसे कम ओवरपोटेंशियल (345 mV) और टेफल ढाल (67.8 mV/dec) के साथ उत्कृष्ट OER प्रदर्शन प्रदर्शित किया, जो बेहतर OER गतिविधि और तीव्र इलेक्ट्रॉन स्थानांतरण गतिकी को दर्शाता है। NTO1 में सर्वाधिक ECSA (19.19 cm^2) पाया गया, जो OER प्रक्रिया के लिए इसके बड़े सक्रिय सतह क्षेत्र को दर्शाता है। क्रोनोपोटेंशियोमेट्री, साइक्लिक वोल्टामेट्री (CV) तथा पोस्ट-OER लक्षण-निर्धारण ने NTO1 की मजबूती और उत्कृष्ट स्थिरता की पुष्टि की। कुल मिलाकर, परिणाम लगातार यह दर्शाते हैं कि सबसे कम हीटिंग रेट पर संश्लेषित NTO1 OER के लिए सर्वोत्तम इलेक्ट्रोकेटलिटिक प्रदर्शन प्रदान करता है, जो Ni_3TeO_6 के उत्प्रेरक गुणों को नियंत्रित करने में कैल्सिनेशन परिस्थितियों की महत्वपूर्ण भूमिका को रेखांकित करता है। यह अध्ययन उन्नत उत्प्रेरकों के तर्कसंगत डिजाइन के लिए रणनीतिक मार्गदर्शन प्रदान करता है।

इसके अतिरिक्त, $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{MoS}_2$ हेटेरोस्ट्रक्चर का समग्र जल विभाजन अभिक्रिया के लिए द्विकार्यात्मक उत्प्रेरक के रूप में अध्ययन किया गया।

इलेक्ट्रोकेमिकल विश्लेषण से पता चला कि अनुकूलित $\text{Ni-MoS}_2-0.3$ नमूने ने क्षारीय माध्यम में HER और OER दोनों के लिए उत्कृष्ट उत्प्रेरक गतिविधि प्रदर्शित की। कम ओवरपोटेंशियल और निम्न टेफल ढालों ने इसकी अनुकूल अभिक्रिया गतिकी की पुष्टि की तथा जल-विभाजन अभिक्रिया को बढ़ावा देने में इसकी दक्षता को दर्शाया। इसके अतिरिक्त, उत्प्रेरक ने उत्कृष्ट दीर्घकालिक टिकाऊपन और संरचनात्मक स्थिरता प्रदर्शित की, जिसकी पुष्टि पोस्ट-इलेक्ट्रोकेमिकल FE-SEM और XPS विश्लेषण द्वारा की गई।

इस बेहतर प्रदर्शन का श्रेय $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{MoS}_2$ हेटेरोइंटरफेस पर होने वाली सहक्रियात्मक इलेक्ट्रॉनिक अंतःक्रियाओं को दिया गया, जिन्होंने आवेश स्थानांतरण दक्षता को बढ़ाया तथा मध्यवर्ती प्रजातियों की अधिशोषण ऊर्जा को अनुकूलित किया, जिससे HER और OER दोनों में सुधार हुआ। कुल मिलाकर, यह कार्य $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{MoS}_2$ नैनोफ्लॉवर्स की एक प्रभावी और स्थिर द्विकार्यात्मक इलेक्ट्रोकेटलिटिस्ट के रूप में क्षमता को प्रदर्शित करता है तथा नवीकरणीय ऊर्जा प्रणालियों में व्यावहारिक जल-विभाजन अनुप्रयोगों के लिए इसे एक आशाजनक उम्मीदवार के रूप में प्रस्तुत करता है।

5. कृतज्ञता ज्ञापन

यह काम UPEIDA द्वारा प्रोजेक्ट के साथ समर्थित है। लेखक इस शोध कार्य के लिए CIF, IIT (BHU) का धन्यवाद करना चाहेंगे जिन्होंने प्रयोगात्मक सेक्शन में मदद की।

संदर्भ ग्रंथ सूची (Bibliography/References)

- [1] Hou J, Yang M. Green Hydrogen Production by Water Electrolysis. n.d.
- [2] Li D, Park EJ, Zhu W, et al. Highly quaternized polystyrene ionomers for high performance anion exchange membrane water electrolyzers. *Nat Energy* 2020;5:378–85. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0577-x>.
- [3] Sharma M, Mishra KK, Singh S, et al. Lattice strain engineering in Ni_3TeO_6 nanostructure for enhanced oxygen evolution reaction in alkaline medium. *Int J Hydrogen Energy* 2025;132:116–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.424>.
- [4] Santos DMF, Sequeira CAC, Figueiredo JL. Hydrogen Production By Alkaline Water Electrolysis. vol. 36. 2013.
- [5] El-Shafie M. Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. *Results in Engineering* 2023;20. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426>.
- [6] Santos DMF, Sequeira CAC, Figueiredo JL. HYDROGEN PRODUCTION BY ALKALINE WATER ELECTROLYSIS. vol. 36. 2013.
- [7] Ghorui UK, Sivaguru G, Teja UB, et al. Anion-Exchange Membrane Water Electrolyzers for Green Hydrogen Generation: Advancement and Challenges for Industrial Application. *ACS Appl Energy Mater* 2024. <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c01585>.
- [8] Tijani AS, Ghani MFA, Rahim AHA, et al. Electrochemical characteristics of (PEM) electrolyzer under influence of charge transfer coefficient. *Int J Hydrogen Energy* 2019;44:27177–89. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.188>.
- [9] Babic U, Suermann M, Büchi FN, et al. Critical Review—Identifying Critical Gaps for Polymer Electrolyte Water Electrolysis Development. *J Electrochem Soc* 2017;164:F387–99. <https://doi.org/10.1149/2.1441704jes>.

- [10] Sun W, Wang Z, Zaman WQ, et al. Effect of lattice strain on the electro-catalytic activity of IrO₂ for water splitting. *Chemical Communications* 2018;54:996–9. <https://doi.org/10.1039/c7cc09580e>.
- [11] Mishra KK, Chauhan M, Singh S, et al. Catalytic performance of hydrothermally processed NiO nanoparticles in environmentally sustainable electrolytic medium. *Fuel* 2025;396. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135313>.
- [12] Chauhan M, Bangwal AS, Borodianskiy K, et al. Electrochemical behavior of nickel oxide nanoelectrocatalyst in diverse electrolytic environments and its application as an effective electrode for supercapacitors. *Electrochim Acta* 2024;473. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143496>.
- [13] De Silva U, Masud J, Zhang N, et al. Nickel telluride as a bifunctional electrocatalyst for efficient water splitting in alkaline medium. *J Mater Chem A Mater* 2018;6:7608–22. <https://doi.org/10.1039/c8ta01760c>.
- [14] Ahmed KW, Habibpour S, Chen Z, et al. Investigation of NiCoO_x catalysts for anion exchange membrane water electrolysis: Performance, durability, and efficiency analysis. *J Energy Storage* 2024;79. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110149>.
- [15] Han J, Yu Y, Wei Y, et al. Industrial electrooxidation of glutaraldehyde waste to glutaric acid via tailoring OH* coverage. *Chem Sci* 2025;16:11970–8. <https://doi.org/10.1039/d5sc02658j>.
- [16] Kumar H, Sharma M, Mishra JN, et al. Ni₃S₂/MoS₂ heterostructure as a bifunctional electrocatalyst for overall water splitting in alkaline medium. *Int J Hydrogen Energy* 2025;150. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150164>.
- [17] Xu X, Zhong W, Zhang L, et al. MoS₂/NiS heterostructure grown on Nickel Foam as highly efficient bifunctional electrocatalyst for overall water splitting. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45:17329–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.175>.