COBALT METAL/METAL OXIDE-BASED NANOMATERIALS SUPPORTED ON CARBON NANOSTRUCTURES FOR HIGH-PERFORMANCE ELECTRO-CATALYSIS

SHWETAMBARA JHA

DEPARTMENT OF CHEMISTRY

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

MAY 2022

Cobalt Metal/Metal Oxide-based Nanomaterials Supported on Carbon Nanostructures for High-Performance Electro-catalysis

by

SHWETAMBARA JHA

Department of Chemistry

Submitted

in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy

to the

Indian Institute of Technology Delhi,

May 2022

Dedicated to my Parents and Teachers

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled, **'Cobalt Metal/Metal Oxide-based Nano-materials Supported on Carbon Nanostructures for High-performance Electro-catalysis**' being submitted by Shwetambara Jha to the Indian Institute of Technology Delhi for the award of the degree of Doctor of Philosophy in Chemistry, is a record of bonafide research work carried out by her. Shwetambara Jha has worked under guidance and supervision and has fulfilled the requirements for the submission of this thesis, which to our knowledge has reached the requisite standard.

The results contained in this dissertation have not been submitted in part or full, to any other university or institute for award of any degree or diploma.

Date:

Prof. Pravin P. Ingole

Associate Professor

Department of Chemistry

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi-110016, India

ACKNOWLEDGEMENTS

At this stage in life, I feel very grateful to wonderful people I have worked with during my doctoral research and thesis compilation. I owe them gratitude, and this thesis work would have been much more difficult without their kind help.

At first, I want to express my gratitude to my Research Guide, Dr. Pravin P Ingole, who, through his regular monitoring and ideas, pushed me to tackle the difficult research difficulties. I was fortunate enough to have him as my supervisor, who gave me complete flexibility to work on my own ideas with little constraints and assisted me in regaining my footing when I was hesitant. I appreciate his constant support. I think I'll be able to get through this stage. His regular guidance on the research activity have aided me in systematically resolving the problems related to work. This eventually resulted in some excellent publications individual meetings, presentation of work related to experiments and data analysis. It has boosted my self-confidence to begin independent research work with a strong grasp of scientific culture. My research guide's incredible ability for time management for all aspects of life is incredibly encouraging, and he certainly stands out as a role model for success. Life is awe-inspiring and serves as a shining example of achievement.

I am grateful to the Head Prof. Anil. J. Elias and former Heads Prof Ravi Shankar, Prof. A. Ramanan, Department of chemistry, IIT Delhi who gave me a platform to perform my work in this prestigious institute and provide me the facilities which makes the research work as comfortable as it could be. I am also thankful to NRF and CRF IIT Delhi for the state of the art research facilities. I am thankful to all the non-teaching staff members of the department for their kind help and cooperation.

I am sincerely thankful to SRC members Prof. Anil Verma, Prof. Siddharth Pandey, and Prof. Hemant K Kashyap, for their precious suggestions, worthful discussion, and advice during the SRC presentation. Their scientific valuable guidance and motivations which led to effectively solving of the problems have greatly helped me to give my thesis its final shape. I am very grateful to Dr. S. N. Jha who did help in the characterization of various samples at RRCAT, Indore.

I am obliged to all my teachers, my friends, and my colleagues from my initial schooling to college. I am very grateful to my seniors and colleagues, Dr. Rasmita Barik for her mentoring and care, Dr. Kajal Dey for his mentoring and art to handle worst situation smartly, Dr. Shahla Imtiyaz, Dr. Kashinath Ojha, Dr. Zeba, Dr. Vaishali Sethi, Dr. Anirban Das, Dr. Agni Biswal, Dr. Nusrat Wani,

Vaishali Tanwar, Priya Jain, Cini M Suresh, Paras Kalra, Jyoti Rohilla for making lab environment cordial and for helping me whenever required. I heartly thank to Priya Jain for support, help and availability whenever I required.

Thanks to my friends Jitender, Shiv Prakash Solanki, Nidhi, Ekta, Bharti, Manisha, Archi and Rishi for being there with me throughout my journey.

There is not enough or exact word in human language to be thankful to my father (Late Mr. Bhagwan Jha) and to my mother (Dr. Kavita Choudhary who left no stone unturned to provide me quality education through out my life. I must also thank my husband (Sanjeet K. Jha), who always supported me whenever I needed his help. Above all, I am thankful for the almighty to give me solidity and insight to attain success and do well for the community.

Shwetambara Jha

ABSTRACT

Due to ever increasing demand of energy and due to the environmental pollution caused by energy system based on fossil fuel, the scientific community has been driven to develop adequate clean energy generating and storage technologies. Energy sources such as fuel cells, supercapacitors, metal-air batteries, and lithium-ion batteries are non-polluting alternatives as compared to sources of energy that are non-renewal such as fossil fuel. These clean energy source has arisen opportunities for the researchers and scientific community to make them mainstream and more affordable for the end consumers. Furthermore, it is desirable that these devices be efficient and cost-effective in order to assure their penetrability in the energy market. The oxygen reduction reaction (ORR) is the rate-determining step in metal-air batteries and fuel cells, for example, and the ideal catalyst is one that helps with the reaction at low overpotential. However, in the special case of rechargeable metal air battery, since ORR as well as OER are equally important and therefore catalyst's multiple roles become even more important The energy efficiency of such electrochemical systems are greatly impacted by the the electrode processes of ORR and OER and therefore it is very important to find the right catalysts which are both energy efficient as well as cost effective. The electrocatalysts that has been proven as most energy efficient in the ORR and OER reactions are the noble metals such as platinum, iridium, palladium, and their alloys, however, as we know these noble metals are extremely costly, rare and do not last long in adverse conditions. Because of their tunable properties and ease of usage, first-row transition metals are widely investigated as feasible and cost-effective alternatives to Pt for ORR. Some of the catalysts that are known to show very good energy efficiency in ORR and OER are oxides of transition metals, oxynitrides, chalcogenides and their complexes. There has been attempts to build hybrid catalysts, such as heteroatom doped carbon framework, metal alloys and metal oxide composites, and it has helped to improve the performance significantly. It is important to note that when N-doped graphene or N-doped carbon nanotubes were used as supports for nanoparticles of the oxides of early transition metal like CoO, Co_3O_4, $MnCo_2O_4$, $ZnFe_2O_4$, $CuCo_2O_4$, NiFe hydroxides which has its size in nanometers, $NiCo_2O_4$, $ZnCo_2O_4$, and CoO, the ORR and OER activity was exceptional. Other parameters such as shape and size of particles, and also the dispersion of catalyst on a conducting substrate, as well as the involvement of

surface intermediates in the reaction process, are found to have a significant impact on the intrinsic activities of these systems. For cobalt based nano alloys and spinel bi-metal oxide atoms, we investigated the synergism effect between nanoparticles and conducting carbon support and also spinel bi- metal oxides which are decorated over carbon support, are helpful in the facilitation of reactions like ORR and OER. The results of the several chapters are summarized here: Chapter 2 is brief highlights of Material and their characterization techniques, In the chapter 3**,** we report a simplistic and facile approach for the fabrication of highly efficient oxygen reduction reaction (ORR) electro-catalyst based on PtCo alloy nanoparticles supported on carbon fiber paper (PtCo@CFP) via potentiostat electro-deposition method. Besides being rapid and facile, this method is highly effective and allows easy control over the kinetics of nucleation and growth process as a function of electro-deposition parameters varied by changing electrodeposition time. We have optimized the electro-deposition time to obtain the PtCo@CFP electro-catalyst that show enhanced electro-catalytic activity for ORR. The results demonstrate that the PtCo@CFP electro-catalyst obtained at electro-deposition time of 600 seconds exhibited the best ORR activity among others, following four electron transfer pathways with minute peroxide formation. We report the multifunctional electrocatalysis activity by platinum-cobalt nanoalloy in chapter 4 with different molar ratios decorated over graphene oxide (PtCo/GO) nanosheet based electrocatalysts synthesized via hydrothermal treatment. All catalysts were thoroughly characterized by XRD, FESEM, XPS, and Raman spectroscopy. The catalyst with 1:1 molar ratio PtCo catalyst anchored on GO shows the excellent multifunctional electro catalytic activity towards ORR, Methanol oxidation reaction (MOR), Hydrogen evolution reaction (HER). The combination of Pt and Co lowers the cost of catalyst by alloying and also its comparable activity with 20% wt. Pt/C is attractive catalyst of choice for fuel cells. Among the possible alternative metals to Pt for better ORR activity, a first-row transition metal Cobalt, Nickel and Iron and its bimetallic composite are regarded as most promising material due to its low cost, abundance, and moderate binder capacity of O_2 molecules towards oxygen electrocatalyst. In chapter 5, development of non-precious platinum free, cost-effective and efficient bi-functional oxygen electro-catalyst is critical for energy conversion devices. Inverse spinel $CoFe_2O_4$ nano-cubes supported on nitrogen doped graphene oxide (NGO) sheets prepared by simple hydrothermal process. NGO is used as supporting material which increases the conductivity and provides surface area of the $CoFe_2O_4$. The crystal structure and composition have been investigated by X-ray diffraction, Raman Spectroscopy as well as X-ray photoelectron spectroscopy

indicating the formation of inverse spinel $CoFe_2O_4$ and its composite with NGO. In chapter 6, we have synthesized mix Cobalt iron sulfide supported on nitrogen/sulfur doped graphene oxide sheets which is prepared by simple reflux method followed by annealing process namely, CoFe-S/NGO. The crystal structure and their composition were investigated by PXRD, FTIR, Raman spectroscopy as well as X-ray photoelectron spectroscopy indicating the formation of composite CoFe-S/NGO. We have investigated the ORR and OER activity and discussed the variation of annealing temperature. CoFe-S/NGO annealed at 250°C shows enhanced ORR and OER activity. In chapter 7 the spinel $NiCo_2O_4$/rGO nanocomposite can be considered as a promising precious metal-free electrocatalyst owing to its high surface area and abundant catalytic active sites. In this study $NiCo_2O_4$/rGO nanoplates were synthesized using a simple refluxing technique, followed by annealing in inert atmosphere. The as synthesized materials were characterized using Scanning electron microscopy, X-ray diffraction, Transmission electron microscopy. The $NiCo_2O_4$/rGO showed enhanced electrocatalytic activities and high stability towards ORR, and OER. This outstanding electrochemical performance could be attributed to the remarkable structural characteristic of the electrocatalyst with a morphology of small nanoparticle assembled nanoplate. These exceptional electrochemical performances could be ascribed to the remarkable structural feature of the electrocatalyst with a nanoplate morphology exhibiting high surface area and void spaces within the surface of nanoplates, which provide large contact areas between electrolyte and active materials for electrolyte diffusion. The as prepared catalyst showed high electrocatalytic activity owing to its synergism between graphene oxide and abundant active sites. The chapter 8 presents an overview of the of the chapters. In the search of new and hybrid materials as an electrocatalyst alternative replacement to precious metal (Pt and Ir), we have investigated lowering the cost of catalyst from precious to non-precious metal-based compounds and their composite for efficient multifunctional catalyst. Several modification and hybridization have been carried out with Co- based compounds e.g., PtCo, Pt_3Co, $CoFe_2O_4$, CoFe-S and $NiCo_2O_4$/rGO. The composites were investigated in detail for electrochemical study, using linear sweep voltammetry, cyclic voltammetry, chronopotentiometry. However, much work is needed to be done on it. New materials exhibiting promising applications are always attractive to the researchers. However, finding of promising materials alternative to Pt for electrocatalysis is still an open challenge to the scientific community.

सार

पारंपरिक जीवाश्म ईंधन आधारित ऊर्जा प्रणालियों के बढ़ते प्रतिकूल प्रभावों और ऊर्जा की मांग में निरंतर वृद्धि के कारण वैज्ञानिक समुदाय को पर्याप्त स्वच्छ ऊर्जा उत्पादन और भंडारण प्रौद्योगिकियों को विकसित करने के लिए प्रेरित किया गया है। लिथियम-आयन बैटरी, सुपरकैपेसिटर, ईंधन सेल, और मेटल-एयर बैटरी सभी पारंपरिक गैर-नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों के स्वच्छ विकल्प के रूप में उभरे हैं, जिससे इस प्रक्रिया में बहुत अधिक वैज्ञानिक और तकनीकी रुचि पैदा हुई है। इसके अलावा, यह वांछनीय है कि ये उपकरण ऊर्जा बाजार में अपनी पैठ सुनिश्चित करने के लिए कुशल और लागत प्रभावी हों। इलेक्ट्रोड सामग्री, सामान्य रूप से, इन उपकरणों का सबसे महंगा घटक है। किसी पदार्थ की इलेक्ट्रोड सामग्री के रूप में कार्य करने की क्षमता इस बात से निर्धारित होती है कि यह विभिन्न इलेक्ट्रोड प्रक्रियाओं को सुविधाजनक बनाने में कितनी अच्छी तरह सहायता कर सकता है। हालांकि, एक रिचार्जेबल मेटल-एयर बैटरी के मामले में, उत्प्रेरक की बहुक्रियाशीलता पर बल देते हुए, ओआरआर और ऑक्सीजन विकास प्रतिक्रिया (ओईआर) दोनों ही महत्वपूर्ण हो जाते हैं। क्योंकि ओआरआर और ओईआर दो प्रमुख इलेक्ट्रोड प्रक्रियाएं हैं जिनका ऊपर उल्लिखित कुछ विद्युत रासायनिक प्रणालियों की ऊर्जा दक्षता पर सीधा प्रभाव पड़ता है, इन प्रतिक्रियाओं की सहायता के लिए लागत प्रभावी और ऊर्जा-कुशल उत्प्रेरक खोजना महत्वपूर्ण है। इन कारकों के आलोक में नोबल-मेटल कंपोजिट के निषेधात्मक कारकों को कम करने के उद्देश्य से कई अध्ययन किए जा रहे हैं। उनके ट्यून करने योग्य गुणों और उपयोग में आसानी के कारण, पहली पंक्ति संक्रमण धातुओं की व्यापक रूप से जांच की जाती है क्योंकि ओआरआर के लिए पीटी के लिए व्यवहार्य और लागत प्रभावी विकल्प हैं। इन महत्वपूर्ण प्रक्रियाओं में संक्रमण धातु ऑक्साइड, चाकोजेनाइड्स, ऑक्सीनिट्राइड्स और उनके परिसरों ने उत्कृष्ट उत्प्रेरक प्रदर्शन का प्रदर्शन किया है। ग्रेफाइटिक कार्बन फ्रेमवर्क और मेटल ऑक्साइड कंपोजिट जैसे हाइब्रिड उत्प्रेरक बनाने के प्रयासों ने भी प्रदर्शन में काफी सुधार किया है। अधिक दिलचस्प बात यह है कि जब एन-डॉप्ड ग्रेफीन या एन-डॉप्ड कार्बन नैनोट्यूब का उपयोग प्रारंभिक संक्रमण धातु ऑक्साइड जैसे CoO, Co_3O_4, $MnCo_2O_4$, $ZnFe_2O_4$, और $CuCo_2O_4$, के नैनोकणों के लिए समर्थन के रूप में किया गया था, तो हेटेरोएटम-डॉप्ड कंडक्टिंग कार्बन का संभावित सहक्रियात्मक प्रभाव। नैनोकणों के परिणामस्वरूप उत्कृष्ट ओआरआर गतिविधि हुई। इसी तरह, नैनोमीटर आकार के NiFe हाइड्रॉक्साइड्स, $NiCo_2O_4$, $ZnCo_2O_4$, और CoO में OER के लिए उच्च गतिविधि और स्थायित्व है। हालांकि ये ऑक्साइड दिलचस्प उत्प्रेरक गतिविधि विशेषताओं को प्रदर्शित करने में सक्षम हैं, अन्य पैरामीटर जैसे कण आकार, आकारिकी, और उत्प्रेरक कणों को एक संवाहक सब्सट्रेट पर कितनी अच्छी तरह फैलाया जाता है, साथ ही साथ प्रक्रिया में शामिल सतह मध्यवर्ती भी पाए जाते हैं। इन प्रणालियों की आंतरिक गतिविधियों पर महत्वपूर्ण प्रभाव। इस प्रकार, हमने एक संवाहक कार्बन पर सक्रिय कणों के फैलाव विशेषताओं के घनिष्ठ संबंध, अन्य धातुओं के प्रतिस्थापन प्रभाव और कोबाल्ट आधारित नैनो मिश्र धातुओं और द्वि-धातु ऑक्साइड स्पिनल परमाणुओं के लिए सतह मध्यवर्ती के नियंत्रित परस्पर क्रिया का पता लगाया है ओआरआर और ओईआर। अध्याय 3 में, हम पोटेंशिएशन इलेक्ट्रो-डिपोजिशन विधि के माध्यम से कार्बन फाइबर पेपर (PtCo@CFP) पर समर्थित PtCo मिश्र धातु नैनोकणों पर आधारित अत्यधिक कुशल ऑक्सीजन कमी प्रतिक्रिया (ORR) इलेक्ट्रो-उत्प्रेरक के निर्माण के लिए एक सरल और आसान दृष्टिकोण की रिपोर्ट करते हैं। तेज और सुगम होने के अलावा, यह विधि अत्यधिक प्रभावी है और इलेक्ट्रो-डिपोजिशन मापदंडों के एक कार्य के रूप में न्यूक्लिएशन और विकास प्रक्रिया के कैनेटीक्स पर आसान नियंत्रण की अनुमति देती है। हमने PtCo@CFP इलेक्ट्रो-उत्प्रेरक प्राप्त करने के लिए इलेक्ट्रो-डिपोजिशन समय को अनुकूलित किया है जो अलग-अलग समय अंतरालों के लिए CFP पर PtCo के इलेक्ट्रो-डिपोजिशन के माध्यम से PtCo@CFP इलेक्ट्रोड का निर्माण करके ORR के लिए बढ़ी हुई इलेक्ट्रो-कैटेलिटिक गतिविधि दिखाते हैं। 300, 600, 900 और 1200 सेकंड। परिणाम प्रदर्शित करते हैं कि सीएफ़पी में जमा पीटीसीओ मिश्र धातु ऑक्सीजन की कमी प्रतिक्रिया की दिशा में उत्कृष्ट विद्युत रासायनिक गतिविधि प्रदर्शित करता है। पीटीसीओ@सीएफपी इलेक्ट्रो-उत्प्रेरक 600 सेकंड के इलेक्ट्रो-डिपोजिशन समय पर प्राप्त होता है/ हम अध्याय 4 में प्लैटिनम-कोबाल्ट नैनोएलॉय द्वारा

बहुक्रियाशील इलेक्ट्रोकैटलिसिस गतिविधि की रिपोर्ट करते हैं, जिसमें हाइड्रोथर्मल उपचार के माध्यम से संश्लेषित विभिन्न दाढ़ अनुपातों से सजाए गए ग्राफीन ऑक्साइड (PtCo / GO) नैनोशीट आधारित इलेक्ट्रोकैटलिस्ट हैं। सभी उत्प्रेरकों को एक्सआरडी, एफईएसईएम, एक्सपीएस और रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी द्वारा पूरी तरह से चित्रित किया गया था। हाल की रिपोर्टों ने प्रदर्शित किया है कि बड़े सैद्धांतिक सतह क्षेत्र (ca. 2600 m^2/g), अल्ट्राहाई विद्युत चालकता और कार्बोनिल, एपॉक्साइड और हाइड्रॉक्सिल की उपस्थिति। लक्षण वर्णन इस बात की पुष्टि करता है कि ये PtCo नैनो मिश्र धातु और ग्रेफीन ऑक्साइड उत्प्रेरक के साथ उनके सम्मिश्रण को पूरी तरह से ग्राफीन ऑक्साइड शीट में वितरित किया जाता है। GO पर लगे 1:1 मोलर अनुपात PtCo उत्प्रेरक के साथ उत्प्रेरक ऑक्सीजन रिडक्शन रिएक्शन (ORR), मेथनॉल ऑक्सीडेशन रिएक्शन (MOR), हाइड्रोजन इवोल्यूशन रिएक्शन (HER) के लिए उत्कृष्ट बहुक्रियाशील इलेक्ट्रो उत्प्रेरक को दर्शाता है। तैयार उत्प्रेरक के रूप में इलेक्ट्रो-कैटेलिटिक गतिविधि का अध्ययन साइक्लिकवोल्टमेट्री (सीवी), लीनियर स्वीपवोल्टमेट्री द्वारा किया जाता है। अध्याय 5 में, गैर-कीमती प्लेटिनम मुक्त, लागत प्रभावी और कुशल द्वि-कार्यात्मक ऑक्सीजन इलेक्ट्रो-उत्प्रेरक का विकास ऊर्जा रूपांतरण उपकरणों के लिए महत्वपूर्ण है जो उलटा स्पिनल $CoFe_2O_4$ नैनो-क्यूब्स पर आधारित नाइट्रोजन डोप्ड ग्रेफीन ऑक्साइड (एनजीओ) शीट पर आधारित है। एक कुशल द्वि-कार्यात्मक ऑक्सीजन इलेक्ट्रोकैटलिस्ट के रूप में सरल हाइड्रोथर्मल प्रक्रिया। एनजीओ का उपयोग सहायक सामग्री के रूप में किया जाता है जो चालकता को बढ़ाता है और $CoFe_2O_4$ का सतह क्षेत्र प्रदान करता है। क्रिस्टल संरचना और संरचना की जांच एक्स-रे विवर्तन, रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी के साथ-साथ एक्स-रे फोटोइलेक्ट्रॉन स्पेक्ट्रोस्कोपी द्वारा की गई है जो स्पिनल $CoFe_2O_4$ और इसके समग्र एनजीओ के गठन का संकेत देती है। बेहतर ओआरआर और ओईआर गतिविधि के लिए पीटी के लिए संभावित वैकल्पिक धातुओं में, पहली पंक्ति संक्रमण धातु कोबाल्ट और आयरन और इसके द्विधात्विक मिश्रित को इसकी कम लागत, बहुतायत और O^{-2} अणुओं की मध्यम बाइंडर क्षमता के कारण सबसे आशाजनक सामग्री माना जाता है। अध्याय 6 में गैर-कीमती कुशल द्वि-कार्यात्मक इलेक्ट्रो-उत्प्रेरक को ऑक्सीजन इलेक्ट्रोकैटलिस्ट में कीमती धातु (Pt और Ir) के विकल्प के रूप में खोजा जा रहा है। इस रिपोर्ट में, हमने नाइट्रोजन फंक्शनलाइज ग्राफीन ऑक्साइड शीट्स पर समर्थित मिक्स कोबाल्ट आयरन सल्फाइड को संश्लेषित किया है, जिसे सरल रिफ्लक्स विधि द्वारा तैयार किया जाता है, जिसके बाद एनीलिंग प्रक्रिया अर्थात् CoFe-S/NGO होता है। क्रिस्टल संरचना और उनकी संरचना की जांच एक्स-रे विवर्तन के साथ-साथ एक्स-रे फोटोइलेक्ट्रॉन स्पेक्ट्रोस्कोपी द्वारा की गई थी। अध्याय 7 में स्पिनल $NiCo_2O_4$ / rGO नैनोकम्पोजिट को इसकी उच्च सतह क्षेत्र और प्रचुर मात्रा में उत्प्रेरक सक्रिय साइटों के कारण एक आशाजनक कीमती धातु-मुक्त इलेक्ट्रोकैटलिस्ट माना जा सकता है। इस अध्ययन में $NiCo_2O_4$/rGO नैनोप्लेट्स को एक साधारण रिफ्लक्सिंग तकनीक का उपयोग करके संश्लेषित किया गया, इसके बाद निष्क्रिय वातावरण में एनीलिंग की गई। संश्लेषित सामग्री के रूप में स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी, एक्स-रे विवर्तन, ट्रांसमिशन इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी का उपयोग करके विशेषता थी। $NiCo_2O_4$/rGO ने बढ़ी हुई इलेक्ट्रोकैटलिटिक गतिविधियों और ओआरआर, और ओईआर के प्रति उच्च स्थिरता दिखाई। इन असाधारण विद्युत रासायनिक प्रदर्शनों को इलेक्ट्रोकैटलिस्ट की उल्लेखनीय संरचनात्मक विशेषता के लिए एक नैनोप्लेट आकारिकी के साथ उच्च सतह क्षेत्र और नैनोबेल्ट की सतह के भीतर शून्य रिक्त स्थान प्रदर्शित किया जा सकता है, जो इलेक्ट्रोलाइट प्रसार के लिए इलेक्ट्रोलाइट और सक्रिय सामग्री के बीच बड़े संपर्क क्षेत्र प्रदान करते हैं। इस काम में, ग्रेफीन ऑक्साइड शीट नैनोकणों पर समर्थित नैनो प्लेट निकल-कोबाल्ट ऑक्साइड को रिफ्लक्स-आधारित संश्लेषण विधि का उपयोग करके तैयार किया गया था, जिसके बाद एनीलिंग तकनीक का उपयोग किया गया था और फिर क्षारीय परिस्थितियों में ओआरआर और ओईआर के लिए एक इलेक्ट्रोकैटलिस्ट के रूप में विशेषता थी। तैयार उत्प्रेरक ने ग्राफीन ऑक्साइड और प्रचुर मात्रा में सक्रिय साइटों के बीच तालमेल के कारण उच्च इलेक्ट्रोकैटलिटिक गतिविधि दिखाई।अध्याय 8 अध्यायों का एक सिंहावलोकन प्रस्तुत करता है। उच्च ऊर्जा घनत्व वाले ऊर्जा भंडारण और रूपांतरण उपकरण महंगे और सड़ने योग्य इलेक्ट्रोड सामग्री की भागीदारी से ग्रस्त हैं, जो उनकी व्यावसायिक व्यवहार्यता को प्रतिबंधित करते हैं।

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

ABBREVIATIONS

CV-	Cyclic Voltammetry
LSV-	Linear Sweep Voltammetry
GCE-	Glassy Carbon Electrode
CE-	Counter Electrode
RE-	Reference Electrode
WE-	Working Electrode
EIS-	Electro Chemical Impedance Spectroscopy
PXRD-	Powder X-ray Diffraction
SEM-	Scanning Electron Microscopy
FTIR-	Fourier Transformed Infra-Red Spectroscopy
TGA-	Thermogravimetric Analysis
XPS-	Xray-Photoelectron Spectroscopy
ORR-	Oxygen Reduction Reaction
MOR-	Methanol Oxidation Reaction
HER-	Hydrogen Evolution Reaction
OER-	Oxygen Evolution Reaction
ECSA-	Electrochemical Active Surface Area
RHE-	Reversible Hydrogen Electrode
J° -	Exchange Current Density
K°-	Kinetic Rate Constant
eV-	Electron Volt
TSC-	tri-Sodium Citrate
CFP-	Carbon Fiber Paper
GO-	Graphene Oxide
rGO-	Reduced Graphene Oxide