INVESTIGATION OF LOW SALINITY WATER FLOOD IN CARBONATE RESERVOIRS

VIVEK RAJ SRIVASTAVA

DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, DELHI

December 2024

INVESTIGATION OF LOW SALINITY WATER FLOOD IN CARBONATE RESERVOIRS

by

VIVEK RAJ SRIVASTAVA

DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING

Submitted

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

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, DELHI
December 2024

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled "**Investigation of Low Salinity Water Flood in Carbonate Reservoirs**" being submitted by **Mr. Vivek Raj Srivastava** to the Indian Institute of Technology Delhi for the award of the degree of Doctor of Philosophy, is a bonafide record of original-research work carried out by him under the guidance and supervision in conformity with rules and regulations of the institute.

The results contained in it have not been submitted in part or full to any other university or institute for the award of any degree/diploma.

Prof. Sharad Kumar Gupta
Department of Chemical Engineering
Indian Institute of Technology, Delhi
Hauz Khas, New Delhi-110016

Prof. Anil Kumar Saroha
Department of Chemical Engineering
Indian Institute of Technology, Delhi
Hauz Khas, New Delhi-110016

Declaration

I declare that this written submission represents my idea in my own words and where others' ideas and words have been included, I have adequately cited and referenced the original source. I also declare that I have adhered to all principles of academic honesty and integrity and have not misrepresented or fabricated or falsified any idea/data/fact/source in my submission. I understand that any violation of the above will come for disciplinary action by the institute and can also evoke penal action from the sources that have thus not been properly cited or from whom proper permission has not been taken when needed.

Vivek Raj Srivastava

Date: 19/12/2024 Vivek Raj Srivastava

Place: Delhi 2017CHZ8274

Acknowledgments

I am deeply grateful to Prof. Sharad Kumar Gupta and Prof. Anil Kumar Saroha for their invaluable guidance throughout the course of this research. Their continuous support has been crucial to the progress of this work. I also extend my sincere thanks to the Head of the Institute, Institute of Reservoir Studies, Ahmedabad, ONGC, for their encouragement and support.

I would like to express my special appreciation to Mr. Sujit Mitra, Mr. Giridhar Gopal, Mr. Anil Thapliyal, and Mr. D.S. Negi for their unwavering assistance and prompt responses to my technical queries. My heartfelt thanks go to all my colleagues at the Water Flood Lab, IRS, who, either directly or indirectly, helped me in learning the various software and conducting experiments related to Low Salinity Water Flood.

I am also extremely thankful to Ms. Abeer Mushtaq Mutto, Mr. Ketan Mahawer, and Mr. Sachin Thorat for their technical and administrative support in the successful completion of this work. I would like to acknowledge and express my gratitude to everyone who, in any way, contributed to this endeavor.

This acknowledgment would be incomplete without recognizing the patience, love, and efforts of my family. I deeply appreciate the understanding, constant moral support, and encouragement of my spouse Garima, and my children Pahal and Garvi, whose unwavering support has been invaluable throughout this journey. This achievement would not have been possible without her dedication and cooperation.

Lastly, I would like to express my heartfelt gratitude to my parents and in-laws for their blessings, support, and best wishes. I also thank the Almighty for their blessings, which kept my spirit high and motivated me to work diligently

Abstract

Low salinity water flood (LSWF) is a most promising enhanced oil recovery (EOR) method where injection water salinity/ ionic composition is modified to increase both microscopic and macroscopic displacement efficiency in carbonate/clastic reservoirs screened based on temperature, wettability, and potential determining ions (PDI) with the added advantage of reducing reservoir souring to a very large extent along with ease of injections into oil-bearing formations. Conventional liquid-based EOR methods struggle in India's western offshore carbonate oil fields due to factors like reservoir heterogeneity, pressure decline, high temperature, and the logistical challenges of an offshore environment. This research explores low-salinity waterflooding as a promising alternative EOR solution to address these limitations and maximize oil recovery. Very few EOR projects have been carried out in offshore environments to date and the majority of the projects have been miscible gas injection projects. While demonstrating the success of LSWF in a specific Indian offshore reservoir, this work extends beyond a single case study. It offers invaluable data relevant to the unique challenges faced in Indian offshore environments, including salinity variations, specific mineralogy, and distinct crude oil composition compared to other LSWF applications. This detailed data significantly addresses a critical knowledge gap for LSWF implementation in such settings. The research provides a comprehensive framework, encompassing laboratory studies, field observations, and a first-of-its-kind high-pressure high temperature (HPHT) evaluation of wettability alteration. Furthermore, it establishes guidelines for screening carbonate reservoirs for their suitability with LSWF. This comprehensive approach offers essential answers for maximizing oil recovery in Indian offshore carbonate reservoirs using LSWF technology.

A multi-pronged approach integrating laboratory experiments, simulations, and field-scale evaluation was employed. Key areas of investigation include the Impact of brine composition, rock-fluid interactions & fluid-fluid compatibility.

Experimental components included: compatibility between the injection water and the formation water, as well as the examination of the interactions between fluid/fluid and rock/fluid in carbonate reservoirs, sequential core flood displacement tests at reservoir conditions using low salinity brines to assess the impact of salinity on oil recovery, an interfacial tension (IFT)study was used to assess the interface between the fluids, while the contact angle and Zeta potential measurements were employed to evaluate the compatibility of the interface between the rock and the fluid, investigation of wettability alteration in an HPHT imbibition cell. Simulation components considered oil/brine/rock interactions and linked

laboratory data to the reservoir. Laboratory experiments revealed that the Wettability Index (WI) and Spontaneous Imbibition (SI) studies serve as effective screening tools for identifying suitable carbonate reservoirs for LSWF. These tests confirmed the occurrence of wettability alteration, where the rock surface became more water-wet. This shift resulted in a significant reduction in residual oil saturation, with recoveries exceeding traditional methods by up to 19 units. Compatibility tests demonstrated the successful use of diluted seawater. Compared to traditional seawater injection, core flood experiments demonstrated a significant 14-20% increase in oil recovery using LSWF. Notably, a 25% dilution of seawater proved to be the optimal salinity for this enhanced oil recovery method. Zeta potential measurements indicated a consistent decrease in values towards more negative levels as the seawater became more diluted. Elevating the concentration of $SO4^{2-}$ ions in the brine may lead to more pronounced negative zeta potential values in comparison to a 25% diluted seawater solution.

A one-dimensional (1D) core flood simulation model with a single porosity was created to adjust the parameters received from the laboratory. The goal was to generate a relative permeability curve for field scale simulation by matching the oil recovery and pressure profiles obtained from core flooding. An adequately accurate history match was achieved.

The field-scale simulation study envisages incremental oil of 1.373 MMt with 35% PV of LSWF which has envisaged additional oil gain of 4.2% of total oil production in the prediction period of 17 years due to LSWF in field M and an additional 0.86 million metric tons of oil recovery using LSWF for field H. At last, a pathway is developed for implementing LSWF in a carbonate reservoir. Field M exhibited a promising response to LSWF, characterized by increased oil production rates, stabilized water cut, and a significant reduction in produced water salinity. The results of this research also expected to play an important role in the 2nd field application of LSWF in the Western offshore Indian Basin.

Overall, this research presents a novel LSWF/Smart water flood (SWF) implementation approach for Indian offshore carbonate reservoirs. It significantly contributes to LSWF knowledge by addressing the unique challenges of these environments. The research establishes screening methods, evaluates wettability alteration mechanisms at high pressures and temperatures, and provides guidelines for optimal LSWF implementation as has already been achieved in the ongoing LSWF pilot in Field M.

सारांश

निम्न लवणता जल फ्लड (लो सैलिनिटी वाटर फ्लड) एक अत्यंत प्रभावी सुधारित तेल पुनर्प्राप्ति विधि है, जिसमें इंजेक्शन जल की लवणता और आयनिक संरचना को इस प्रकार संशोधित किया जाता है, ताकि कार्बोनेट और क्लास्टिक जलाशयों में सूक्ष्म और विशाल विस्थापन दक्षता दोनों में वृद्धि हो सके। यह विधि तापमान, वेटेबिलिटी और संभावित निर्धारित आयनों के आधार पर चयनित की जाती है, और इसके अतिरिक्त, यह जलाशयों के खट्टेपन को काफी हद तक कम करने के साथ-साथ तेल-धारण करने वाली संरचनाओं में इंजेक्शन की प्रक्रिया को सरल बनाती है। पारंपरिक तरल-आधारित तेल पुनर्प्राप्ति विधियाँ भारत के पश्चिमी तटीय कार्बोनेट तेल क्षेत्रों में जलाशय की विषमताओं, दबाव में गिरावट, उच्च तापमान, और समुद्रतटीय पर्यावरण की लॉजिस्टिक चुनौतियों के कारण संघर्ष करती हैं। यह शोध निम्न लवणता जल फ्लडिंग को इन सीमाओं को दूर करने और तेल पुनर्प्राप्ति को अधिकतम करने के लिए एक प्रभावी वैकल्पिक समाधान के रूप में प्रस्तुत करता है। अब तक समुद्रतटीय क्षेत्रों में बहुत कम तेल पुनर्प्राप्ति परियोजनाएँ की गई हैं, और अधिकांश परियोजनाएँ मिश्रणीय गैस इंजेक्शन पर आधारित रही हैं।

इस अध्ययन में भारतीय समुद्रतटीय जलाशय में निम्न लवणता जल फ्लड की सफलता को प्रदर्शित किया गया है, और यह एकल केस अध्ययन से आगे बढ़ते हुए, भारतीय समुद्रतटीय वातावरण में उत्पन्न होने वाली विशिष्ट चुनौतियों से संबंधित अमूल्य डेटा प्रदान करता है। इसमें लवणता के परिवर्तन, विशिष्ट खनिजविज्ञान और अन्य निम्न लवणता जल फ्लड अनुप्रयोगों के मुकाबले क्रूड तेल की विशेष रचना शामिल हैं। यह विस्तृत डेटा निम्न लवणता जल फ्लड को इन वातावरणों में लागू करने के लिए एक महत्वपूर्ण ज्ञान अंतर को समाप्त करता है। यह शोध एक समग्र ढांचा प्रस्तुत करता है, जिसमें प्रयोगशाला अध्ययन, क्षेत्रीय अवलोकन और उच्च दबाव उच्च तापमान पर वेटेबिलिटी परिवर्तन का मूल्यांकन किया गया

है। इसके अतिरिक्त, यह कार्बोनेट जलाशयों की उपयुक्तता के लिए स्क्रीनिंग दिशा-निर्देशों की स्थापना करता है। इस समग्र दृष्टिकोण से भारतीय समुद्रतटीय कार्बोनेट जलाशयों में निम्न लवणता जल फ्लड तकनीक का उपयोग करके तेल पुनर्प्राप्ति को अधिकतम करने के लिए आवश्यक समाधान प्राप्त होते हैं।

इस अध्ययन में एक बहुआयामी दृष्टिकोण अपनाया गया, जिसमें प्रयोगशाला प्रयोग, सिमुलेशन और क्षेत्र-स्तरीय मूल्यांकन शामिल हैं। प्रमुख अनुसंधान क्षेत्रों में बाइन संरचना का प्रभाव, शिला-तरल इंटरएक्शन और तरल-तरल संगतता शामिल थे।

प्रयोगात्मक घटकों में इंजेक्शन पानी और गठन पानी के बीच संगतता, कार्बोनेट जलाशयों में शिला/तरल और तरल/तरल के बीच इंटरएक्शन की जांच, जलाशय की स्थितियों में निम्न लवणता ब्राइन का उपयोग करके अनुक्रमिक कोर फ्लड विस्थापन परीक्षण, जो लवणता के तेल पुनर्प्राप्ति पर प्रभाव का मूल्यांकन करते हैं, और इंटरफेसियल टेंशन अध्ययन शामिल थे, जो तरल पदार्थों के बीच इंटरफेस का मूल्यांकन करते हैं। इसके अलावा, संपर्क कोण और ज़ेटा पोटेंशियल माप का उपयोग शिला और तरल के बीच इंटरफेस की संगतता का मूल्यांकन करने के लिए किया गया, और उच्च दबाव उच्च तापमान इम्बिबिशन सेल में वेटेबिलिटी परिवर्तन की जांच की गई।

सिमुलेशन घटकों में तेल/ब्राइन/शिला इंटरएक्शन और प्रयोगशाला डेटा को जलाशय से जोड़ने पर विचार किया गया। प्रयोगशाला प्रयोगों ने यह साबित किया कि वेटेबिलिटी इंडेक्स और स्वैच्छिक इम्बिबिशन अध्ययन लो सैलिनिटी वाटर फ्लड के लिए उपयुक्त कार्बोनेट जलाशयों की पहचान करने के प्रभावी स्क्रीनिंग टूल के रूप में काम करते हैं। इन परीक्षणों ने वेटेबिलिटी परिवर्तन की पुष्टि की, जिसमें शिला की सतह अधिक जल-प्रवृत्त हो गई, जिससे अवशिष्ट तेल संतृप्ति में महत्वपूर्ण कमी आई और पारंपरिक विधियों की तुलना में 19 यूनिट तक अधिक पुनर्प्राप्ति संभव हुई। संगतता परीक्षणों ने पतला समुद्री जल के सफल उपयोग को प्रदर्शित किया। पारंपरिक समुद्री जल इंजेक्शन की तुलना में, कोर फ्लड परीक्षणों ने लो

सैलिनिटी वाटर फ्लड का उपयोग करते हुए तेल पुनर्प्राप्ति में 14-20% की महत्वपूर्ण वृद्धि दिखाई। उल्लेखनीय रूप से, समुद्री जल का 25% घोल इस सुधारित तेल पुनर्प्राप्ति विधि के लिए आदर्श लवणता साबित हुआ। ज़ेटा पोटेंशियल मापों ने यह संकेत दिया कि जैसे-जैसे समुद्री जल अधिक पतला हुआ, वैल्यूज़ में लगातार गिरावट आई और अधिक नकारात्मक स्तरों की ओर झुका। ब्राइन में सल्फेट आयनों की सांद्रता बढ़ाने से 25% पतला समुद्री जल घोल की तुलना में अधिक नकारात्मक ज़ेटा पोटेंशियल मान उत्पन्न हो सकते हैं।

एक एकल पोरोसिटी के साथ एक-आयामी कोर फ्लड सिमुलेशन मॉडल तैयार किया गया ताकि प्रयोगशाला से प्राप्त मापदंडों को समायोजित किया जा सके। लक्ष्य यह था कि कोर फ्लडिंग से प्राप्त तेल पुनर्प्राप्ति और दबाव प्रोफाइल से मेल खाते हुए क्षेत्रीय सिमुलेशन के लिए एक सापेक्ष पारगम्यता वक्र उत्पन्न किया जाए। एक उपयुक्त रूप से सटीक इतिहास मिलान प्राप्त किया गया।

क्षेत्र-स्तरीय सिमुलेशन अध्ययन ने 35% पोर वॉल्यूम लो सैलिनिटी वाटर फ्लड के साथ 1.373 मिलियन मीट्रिक टन तेल के अतिरिक्त उत्पादन का अनुमान लगाया, जिसमें लो सैलिनिटी वाटर फ्लड के कारण क्षेत्र M में 17 वर्षों की भविष्यवाणी अवधि में कुल तेल उत्पादन का 4.2% अतिरिक्त तेल प्राप्ति का अनुमान है, और क्षेत्र H में लो सैलिनिटी वाटर फ्लड का उपयोग करके 0.86 मिलियन मीट्रिक टन अतिरिक्त तेल पुनर्प्राप्ति का अनुमान है। अंत में, कार्बोनेट जलाशयों में लो सैलिनिटी वाटर फ्लड को लागू करने के लिए एक मार्ग विकसित किया गया। क्षेत्र M ने लो सैलिनिटी वाटर फ्लड के प्रति एक आशाजनक प्रतिक्रिया प्रदर्शित की, जिसमें तेल उत्पादन दरों में वृद्धि, जल कटौती का स्थिरीकरण और उत्पादित जल लवणता में महत्वपूर्ण कमी दिखाई दी। इस शोध के परिणामों को भारतीय पश्चिमी तटीय क्षेत्र में लो सैलिनिटी वाटर फ्लड के दूसरे क्षेत्रीय आवेदन में भी महत्वपूर्ण भूमिका निभाने की उम्मीद है।

कुल मिलाकर, यह शोध भारतीय समुद्रतटीय कार्बोनेट जलाशयों के लिए लो सैलिनिटी वाटर फ्लड/स्मार्ट वाटर फ्लड लागू करने का एक नवीन दृष्टिकोण प्रस्तुत करता है। यह इन पर्यावरणों की विशिष्ट चुनौतियों को संबोधित करके लो सैलिनिटी वाटर फ्लड ज्ञान में महत्वपूर्ण योगदान करता है। यह शोध स्क्रीनिंग विधियों की स्थापना करता है, उच्च दबाव और तापमान पर वेटेबिलिटी परिवर्तन तंत्र का मूल्यांकन करता है, और लो सैलिनिटी वाटर फ्लड को सर्वोत्तम तरीके से लागू करने के लिए दिशा-निर्देश प्रदान करता है, जैसा कि पहले से चल रहे लो सैलिनिटी वाटर फ्लड पायलट परियोजना में क्षेत्र M में हासिल किया गया है।

Contents

List of Figures

List of Tables

List of Symbols, Abbreviations and Nomenclature

Symbol	Definition
Cs	Interpolated salinity concentration
Cs^1	Minimum salinity
Cs^2	Maximum salinity
Krw	Relative permeability of water
Kro	Relative permeability of oil
Pcow	Capillary pressure
Cs	Upper limit of salinity range
ζ	Zeta Potential (mV)
ppm	part per million
Ø	Porosity
Soi	Initial oil saturation
Kair	Air permeability
mD	Milli Darcy

Abbreviations

AN	Acid Number
EDL	Electric Double Layer
EOR	Enhanced Oil Recovery
HPHT	High-Pressure High Temperature
LSWF	Low-Salinity Water Flooding
SWF	Smart Water Flooding
MIE	Multi-Ion Exchange
PDIs	Potential Determining Ions
PV	Pore Volume
SW	Seawater
x% dSW	A diluted brine which has x% Seawater
TDS	Total Dissolved Solids (TDS), ppm
XRD	X-ray Diffraction
XRF	X-ray Fluorescence
IFT	Interfacial Tension
CMG	Computer Modelling Group
DSA-100	Drop Size analyzer-100
NMR	Nuclear Magnetic Resonance