



AN ASSESSMENT OF PRETREATMENT PERFORMANCE AND PROCESS DESIGN OF REVERSE OSMOSIS PLANT - CASES STUDY

By

Nermeen Ahmed Abd El-Baery El-Melegae

A Thesis Submitted to the
Faculty of Engineering at Cairo University
in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Of
MASTER OF SCIENCE
in
CIVIL ENGINEERING - PUBLIC WORKS

FACULTY OF ENGINEERING, CAIRO UNIVERSITY
GIZA, EYGPT
2015

AN ASSESSMENT OF PRETREATMENT
PERFORMANCE AND PROCESS DESIGN OF
REVERSE OSMOSIS PLANT- CASES STUDY

By

Nermeen Ahmed Abd El-Baery El-Melegae

A Thesis Submitted to the
Faculty of Engineering at Cairo University
in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Of
MASTER OF SCIENCE
in
CIVIL ENGINEERING - PUBLIC WORKS

Under the Supervision of

Prof. Dr. Ehab M. Rashed

Dr. Khaled Z. Abdalla

Professor of Sanitary and Environmental
Engineering Department
Faculty of Engineering, Cairo University

Associate Professor of Sanitary and
Environmental Engineering Department
Faculty of Engineering, Cairo University

FACULTY OF ENGINEERING, CAIRO UNIVERSITY
GIZA, EGYPT
2015

AN ASSESSMENT OF PRETREATMENT PERFORMANCE AND PROCESS DESIGN OF REVERSE OSMOSIS PLANT- CASES STUDY

By

Nermeen Ahmed Abd El-Baery El-Melegae

A Thesis Submitted to the
Faculty of Engineering at Cairo University
in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of
MASTER OF SCIENCE
in
CIVIL ENGINEERING - PUBLIC WORKS

Approved by the Examining Committee

Prof. Dr. Ehab Mohamed Rashed

Professor of Sanitary Engineering, Cairo University

Prof. Dr. Nabil Mohmoud Abd. El-Monem

Professor of Chemical Engineering, Cairo University

Prof. Dr. Mohamed El-Hosseiny Elnadi

Professor of Sanitary Engineering, Ain Shams University

FACULTY OF ENGINEERING, CAIRO UNIVERSITY
GIZA, EGYPT
2015

Engineer: Nermeen Ahmed Abd El-Baery El-Melegee
Date of Birth: 20 / 09 / 1980
Nationality: Egyptian
E-mail: nermeen.elmelegee@gmail.com
Phone: 02-22613167 // 010-60047112
Registration Date: 01 / 10 / 2010
Awarding Date: / /
Degree: Master of Science Degree
Department: Civil Engineering - Public Work



Supervisors: Prof. Dr. Ehab M. Rashed
Dr. Khaled Z. Abdalla

Examiners: Prof. Dr. Mohamed El-Hosseiny Elnadi
Professor of Sanitary and Environmental Engineering
Shams University
Prof. Dr. Nabil M. Abd.El-Monem
Prof. Dr. Ehab M. Rashed

Title of Thesis:

An Assessment of Pretreatment Performance and Process Design of Reverse Osmosis Plant- Cases Study

Key Words: (Reverse Osmosis Membrane – Fouling – Pretreatment – Ultrafiltration Membrane - Flux)

Summary:

Membrane fouling is the main operating problem of reverse osmosis process, the research investigate the influences of fouling materials on the performance of three plant fed by (fresh municipal water, seawater, and ground water) assess the pretreatment processes, and normalizes and optimizes reverse osmosis unit design, the research conclude that, in first plant, aluminum-based fouling increases the permeate salinity 3 times, decrease flux 25% in 3 months in municipal water plant, replacing conventional pretreatment by ultrafiltration membrane pretreatment restore the plant performance. In second plant, colloidal and organic fouling decreases the fouling factor that elevates the applied pressure 15% in seawater plant. In third plant, iron-organic fouling, increase of well salinity and temperature, and improper pretreatment and membrane type causes 7 times replacement of plant membranes and prolong shutdown intervals, by changing these constrains the plant performance is modified.



تقييم كفاءة نظم المعالجة الأولية و التصميم لمحطات التحلية بتقنية الأسبوزية العكسية - دراسة حالة

إعداد

نيرمين أحمد عبد الباري المليجي

رسالة مقدمة إلي كلية الهندسة - جامعة القاهرة
كجزء من متطلبات الحصول علي درجة ماجستير العلوم
في الهندسة المدنية - الأشغال العامة

كلية الهندسة - جامعة القاهرة
الجيزة - جمهورية مصر العربية
٢٠١٥

تقييم كفاءة نظم المعالجة الأولية و التصميم لمحطات التحلية بتقنية الأسموزية العكسية – دراسة حالة

إعداد

نيرمين أحمد عبد الباري المليجي

رسالة مقدمة إلي كلية الهندسة – جامعة القاهرة
كجزء من متطلبات الحصول علي درجة الماجستير
في الاشغال العامة

تحت إشراف

د. خالد زاهر عبد الله
أستاذ مساعد الهندسة الصحية و البيئية
كلية الهندسة جامعة القاهرة

أ.د. إيهاب محمد راشد
أستاذ الهندسة الصحية و البيئية
كلية الهندسة جامعة القاهرة

كلية الهندسة – جامعة القاهرة
الجيزة – جمهورية مصر العربية
٢٠١٥

تقييم كفاءة نظم المعالجة الأولية و التصميم لمحطات التحلية بتقنية الأسموزية العكسية – دراسة حالة

إعداد

نيرمين أحمد عبد الباري المليجي

رسالة مقدمة إلي كلية الهندسة – جامعة القاهرة
كجزء من متطلبات الحصول علي درجة الماجستير
في الاشغال العامة

يعتمد من لجنة الممتحنين

أ.د. محمد الحسيني النادي
أستاذ الهندسة الصحية و البيئية - كلية الهندسة جامعة عين شمس

أ.د. نبيل محمود عبد المنعم
أستاذ الهندسة الكيميائية - كلية الهندسة جامعة القاهرة

أ.د. إيهاب محمد راشد
أستاذ الهندسة الصحية و البيئية - كلية الهندسة جامعة القاهرة

كلية الهندسة – جامعة القاهرة
الجيزة – جمهورية مصر العربية
٢٠١٥



مهنة: دس: نيرمين احمد عبد الباري المليجي

تاريخ الميلاد: ٢٠ / ٠٩ / ١٩٨٠

الجنسية: مصرية

تاريخ التسجيل: ٠١ / ١٠ / ٢٠١٠

تاريخ المنح: / /

القسم: الهندسة مدنية - الاشغال عامة.

الدرجة: ماجستير العلوم.

المشرفون: أ.د. إيهاب محمد راشد

أ.م.د. خالد زاهر عبد الله

المتحنون: أ.د. محمد الحسيني النادي - أستاذ الهندسة الصحية و البيئية جامعة عين شمس

أ.د. نبيل محمود عبد المنعم

أ.د. إيهاب محمد راشد

عنوان الرسالة:

تقييم كفاءة نظم المعالجة الأولية و التصميم لمحطات التحلية بتقنية الاسموزية العكسية - دراسة حالة

الكلمات الدالة: -

(أغشية التناضح العكسي - الإنسداد - المعالجة الابتدائية - الأغشية فائقة الترشيح - التدفق)

ملخص البحث:

إنسداد الأغشية هو المشكلة التشغيلية الأبرز في محطات الإزموزية العكسية، وبحثت الرسالة تأثير المواد المسببة للإنسداد علي أداء ٣ محطات تستخدم مياه البلدية و مياه البحر و الآبار، و قيم تصميم و نتائج عمليات المعالجة الابتدائية و وحدات التحلية، فكان بقايا كبريتات الالمونيوم هو ما رفع ملوحة المنتج ثلاثة أضعاف المصمم لها و خفض الإنتاج ٢٥% في ثلاث أشهر في محطة مياه البلدية لفشل المعالجة الابتدائية التقليدية و بإستخدام الأغشية فائقة الترشيح أمكن إعادة الوحدة لكفاءتها إلي حد كبير، فيما كان الإنسداد بالمواد الرغوية و العضوية هو ما خفض معامل الإنسداد و رفع الضغط المستخدم ١٥% في محطة مياه البحر الاحمر، اما تفاعل الحديد مع المواد العضوية، و إرتفاع ملوحة الآبار و درجة الحرارة و عدم مناسبة المعالجة الابتدائية و الأغشية المستخدمة فكان السبب في تغيير أغشية محطة مياه الآبار لسبع مرات و تعطلها المتكرر و كان تغيير عمليات المعالجة الابتدائية و نوع الأغشية المستخدمة الحل في إعادة كفاءة المحطة.

Acknowledgements

This dissertation would not have been possible without the guidance and support from the following people. First, I would like to thank my thesis committee members, Dr. Ihab Rashed, Dr. Khaled Zaher. I would like to express my special thanks to my supervisor, Dr. Khaled Zaher, who led me through the study with his guidance, motivation, and patience.

I would like to gratefully acknowledge Eng. Sameh Zahria at Nesco Co., Eng. Fathey El-Ghazawi at National Corn Co., and engineers of City Water, Ietos, C.E.G., Aqua Nile, Suez for Fertilizers, Metito, WTCO, and South Sinai water company for presenting me a precious opportunity to fellow up a Reverse Osmosis Plants; I thank their willingness to help when needed.

Finally, I thank my family for their unconditional love and enthusiastic support. Especially I give my heartfelt thanks to my mother for her love, care, and encouragement; she is a major driving force for me striving to do my best.

Abbreviations

ASTM	American Society for Testing and Materials.
cfm	cubic feet per minute
CIP	Clean-In-Place
Concentrate	RO brine (reject stream)
DAF	dissolved air floatation
DBP	disinfection byproducts
DOC	dissolved organic carbon
EC	electrical conductivity
ERD	energy recovery device
FRP	fiberglass-reinforced plastic
ft	feet
gal	gallon
gfd	gallons per square foot per day of membrane area
gph	gallons per hour
gpm	gallons per minute
LP	Low Pressure
LSI	Langelier Saturation Index
HP	High Pressure
MF	microfiltration
mg/L	milligram per liter
mgd	million gallons per day
mS/cm	milliSiemens per centimeter
NaOCl	sodium hypochlorite
NTU	nephelometric turbidity unit
O&M	operations and maintenance
ORP	oxidation-reduction potential
psi	pounds per square inch
ppb	parts per billion
ppm	parts per million
PX	Pressure Exchanger
RO	reverse osmosis
SDI	silt density index
SEM	Scanning electron microscope
SWRO	Seawater Reverse Osmosis
TDS	total dissolved solids
TMP	Transmembrane pressure

TSS	total suspended solids
THMs	tri-halomethanes
TOC	total organic carbon
UF	ultrafiltration
UV	ultraviolet
UV ₂₅₄	UV absorption at 254 nm wavelength
WHO	World Health Organization

Symbols

A	Total Membrane Area
B	Solute Transport "Permeability" Coefficient
C_c	Concentration of Solute in the Concentrate
C_f	Concentration of Solute in the Feed
C_p	Concentration of Solute in the Permeate
C_w	Water Concentration in the Membrane
$C_{f,ave}$	Average TDS concentration in the feed
ΔC	Concentration Gradient $\Delta C = C_f - C_p$
C_i	concentration ion (g/m.)
D	Water Diffusivity In The Membrane,
D_s	Solute Diffusivity in the Membrane
D_w	Water Diffusivity in the Membrane
IP	ion product = [cation] ^a [anion] ^b
K_{SP}	solubility product = [cation] ^a [anion] ^b
J	Permeate flux at filtration time t., L/m ² h
J_o	initial permeate flux at filtration start time., L/m ² h
J_s	Volumetric Flux of Solute, L/m ² h
J_w	Volumetric Flux of Water, L/m ² h
L	Water Transport "Permeability" Coefficient
M_i	molecular weight ion (g/mol)
NDP	Net Driving Pressure
P_c	Pressure of Water in the Concentrate
ΔP_d	Pressure Drop of Water in the Concentrate, average feed/concentrate channel pressure
P_f	Pressure of Water in the Feed
P_p	Pressure of Water in the Permeate
ΔP	Pressure Difference across the Membrane
Q_C	concentrate flow rate, L/h
Q_F	feed stream flow rate, L/h
Q_p	permeate flow rate, L/h
R	Permeate Recovery
R	Ideal Gas Constant, (J/K.mol)
S	Water Solubility In The Membrane,
SP	salt passage ratio (%)
S_x	super-saturation index
t	permeation time (h)
T	Temperature
TMP	Trans-Membrane Pressure

V	volume of permeate (L)
V	Molar Volume Of The Water,
\bar{V}_w	Partial Molar Volume Of Water
Z_i	valence ion (-)
δ	Membrane Thickness
β	Concentration polarization factor
$\bar{\pi}$	Average Feed concentrate osmotic pressure
π_f	Feed Water Osmotic Pressure
π_p	Average Feed Permeate concentrate osmotic pressure
π	osmotic pressure (Pa)
$\Delta\pi$	Osmotic Pressure Difference Across the Membrane
$\sum X_i$	molar concentration of all dissolved salts (kg.mol/m ³)
K	membrane resistance coefficient (m ⁻¹) (psi · s · m ²)/L
μ	dynamic viscosity of water (Ns/m ²)
a	the quantity of cation present within the salt
b	the quantity of anion present within the salt.

Table of Content

Acknowledgements	II
Abbreviations	III
Symbols	V
Table of Contents	VII
List of Figures	XII
List of Tables	XIV
List of Charts	XV
Abstract	XVI
CHAPTER 1 INTRODUCTION	
1.1 Overview	1
1.2 Thesis Objective	1
1.3 Layout of the Thesis	2
1.4 Global Water Availability	2
1.5 Water Status in Egypt	4
1.5.1 Water Resources in Egypt	5
1.6 Desalination	6
1.6.1 Type of Desalination	7
1.6.1.1 Thermal Desalination	8
1.6.1.2 Membrane Desalination	8
1.6.2 Worldwide Desalination Status	10
1.6.2.1 Worldwide R.O. Desalination Statistics	11
1.6.3 Desalination in Egypt	13
CHAPTER 2 Literature review	
Part One Reverse Osmosis Process	
2.1 Osmosis & Reverse Osmosis Definition	17
2.2 Modes of Operation	18
2.2.1 Dead-End Vs. Cross-Flow Filtration	18
2.2.2 Constant Flux Vs. Constant Pressure Operation	19
2.3 Transport Models of Water and Salt Through Reverse Osmosis Membranes	19
2.3.1 Nonporous Solution-Diffusion Transport Mode	19
2.3.2 Water and Salt Transport Rates	20
2.4 Reverse Osmosis Process Design	22
2.4.1 Reverse Osmosis Membrane Design	22
2.4.1.1 R.O Membrane Configuration: Spiral Wound	22
2.4.1.1.1 Parts of Spiral Wound Membrane	24
2.4.1.1.2 Spiral-Wound RO Membrane Elements	26
2.4.1.2 R.O Membrane Structure: Thin-Film Composite	26
2.4.1.3 R.O Membrane Material	27
2.4.2 Reverse Osmosis System Design	28

2.4.3	Reverse Osmosis Process Parameters	30
2.4.3.1	Mass Balance	30
2.4.3.2	Osmotic Pressure	30
2.4.3.3	Applied Pressure Difference	31
2.4.3.4	Net Driving Pressure "NDP"	31
2.4.3.5	Membrane Permeate Flux	32
2.4.3.6	Critical Flux	34
2.4.3.7	Specific Flux "Membrane Permeability"	34
2.4.3.8	Recovery	34
2.4.3.9	Concentration Factor	36
2.4.3.10	Salt Passage	36
2.4.3.11	Salt Rejection	36
2.4.3.12	Permeate Flux Decline	37
2.4.4	Factors Affects Reverse Osmosis Performance	37
2.4.4.1	Effect of Salinity on Membrane Performance	37
2.4.4.2	Effect of Recovery on Membrane Performance	38
2.4.4.3	Effect of Temperature on Membrane Performance	38
2.4.4.4	Effect of Feed Pressure on Membrane Performance	39
2.4.4.5	Effect of Permeate Back Pressure on Membrane Performance	40
2.4.5	Reverse Osmosis Configuration	40
2.5	Reverse Osmosis Rejection Mechanism	45
2.6	Flux Decline	46
2.6.1	Concentration Polarization	47
2.6.2	Fouling	48
2.6.2.1	Fouling Mechanism	49
2.6.2.2	Fouling Location	50
2.6.2.3	Type of Fouling	51
2.6.2.3.1	Particulate Fouling	51
2.6.2.3.2	Organic Fouling	52
2.6.2.3.3	Bio-Fouling	53
2.6.2.3.4	Inorganic Fouling	54
2.6.2.4	Identifying Fouled, Scaled, and Degraded Membranes	59
2.6.2.4.1	Pre-Design Identification	59
2.6.2.4.2	Operational Identification	60
2.6.2.4.3	After Fouling Identification	60
2.6.2.5	Factors Affecting Membrane Fouling	61
2.6.2.5.1	Driving Pressure	62
2.6.2.5.2	Feed Water Characteristics	62
2.6.2.5.3	Membrane Characteristics	63
2.6.2.6	Controlling Membrane Fouling, Scaling, And Degradation	64
2.6.2.6.1	Tailoring of Membrane Properties	64
2.6.2.6.2	Improvement of Operating Conditions	65
2.6.2.6.3	Pretreatment of Feed Solution	65
2.6.2.6.3.1	Chemical Treatment	67