

Convective Heat Transfer Fouling of Aqueous Solutions on Modified Surfaces

A thesis accepted by the Faculty of Energy Technology, Process Engineering and Biological
Engineering of the University of Stuttgart in Partial Fulfilment of the Requirements
for the Degree of
Doctor of Engineering Sciences (Dr.-Ing.)

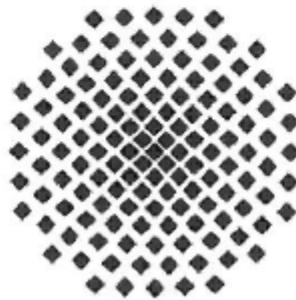
By

Abdullah K. O. Al-Janabi

born in Babylon, Iraq

Chairman: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Göde
Main referee: Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. H. Müller-Steinhagen
Co-referee: Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht

Date of oral examination: 4th April 2011



Institute of Thermodynamics and Thermal Engineering
University of Stuttgart, Germany

2011

ABSTRACT

The present research study was part of the European project "MEDESOL" entitled "Seawater desalination by innovative solar-powered membrane-distillation system". The project aimed at developing a stand-alone desalination unit to produce fresh water with a maximum of 50 m³/day. Several components such as suitable membrane and efficient solar collectors had to be developed as well as a plate heat exchanger for a maximum life expectancy with least deposition occurrence on its surfaces. The contribution of ITW to this project was mainly concerned with the development of innovative anti-fouling heat transfer surfaces that could substantially i) reduce the design and operation penalties, and ii) increase the membrane distillation efficiency. To achieve this goal, this study endeavoured to address some outstanding questions such as:

- 1) The impact of surface texture in terms of roughness and structured grooves on the fouling propensity.
- 2) The effect of various modified surfaces on adhesion mechanisms between the deposits and the heat transfer surfaces.
- 3) A criterion that would predict whether a modified surface would foul or not.

Accordingly, a comprehensive and rigorous set of fouling runs was performed with calcium sulphate solution as working fluid. The operating conditions followed closely to those expected in the membrane distillation desalination unit i.e. a fluid velocity of up to 0.3 m/s and a maximum surface temperature of 90°C.

The experimental results showed that i) increasing surface roughness causes a significant reduction of the nucleation correction factor (ϕ). As a consequence, a higher fouling rate would be expected due to the reduction in the energy barrier limit of crystallization; ii) in case of grooved surfaces, the generated eddies within the crossed grooves have vortices which are opposite to those of the mainstream. This would overcome the adhesion forces between the crystals and the heat transfer surfaces and gave rise to longer induction time and lower fouling rate; and iii) the deposition process was strongly affected by altering the surface energy properties, particularly the electron donor component (γ_2^-) for the

coatings investigated in this study. Lower initial fouling rate and longer induction time were the main features of coatings having higher γ_2^- .

A new criterion has also been developed that predicts whether a modified surface will foul or not. In this criterion, the total interaction energy depends strongly on the Lewis acid-base energy while the contribution of the Lifshitz-van der Waals energy is marginal. A validation of the new criterion was carried out by comparison with the experimental results of the present study as well as some previous investigations of precipitation and biofouling. The validation results confirmed the reliability and accuracy of the new criterion.

Finally, the coatings that performed best in terms of fouling mitigation in the laboratory tests were selected for field assessment in two successive phases. No sign of fouling was observed in either phase. However, in phase 1, substantial flaking-off of the coatings occurred in particular around the inlet and outlet sections of the heat exchanger as well as at the contact points between plates. In phase 2, a thinner coating was applied with a more roughened surface which resulted in far better stickiness of coatings to the surface.

KURZFASSUNG

Die Forschungsarbeit "Seawater desalination by innovative solar-powered membrane-distillation system" war Teil des europäischen Projektes MEDESOL. Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer autark operierenden Entsalzungsanlage für die Frischwasserproduktion von maximal 50 m³/Tag. Verschiedene Komponenten wie zum Beispiel adäquate Membranen und effiziente Solarkollektoren mussten entwickelt werden. Ebenso wurde ein verbesserter Plattenwärmeübertrager entwickelt, um eine maximale Lebensdauer mit minimalem Ablagerungsvorkommen auf den Flächen zu gewährleisten.

Die Mitwirkung des ITW an diesem Projekt betraf hauptsächlich die Entwicklung innovativer Anti-fouling-Wärmeübertragungsflächen, die im Wesentlichen i) die Mehrkosten aufgrund der konstruktiven Ausführung und der Betriebsbedingungen reduzieren können, sowie ii) die Effizienz der Membrandistillation steigern sollen.

Um dieses Ziel zu erreichen, befasst sich diese Arbeit mit folgenden Punkten:

- 1) Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit, d.h. Rauheit und strukturierte Riefen, auf die Neigung zur Ablagerung.
- 2) Auswirkung diverser modifizierter Oberflächen auf die Adhäsion zwischen den Ablagerungen und der Wärmeübertragungsfläche.
- 3) Aufstellen eines Kriteriums, mit dem bestimmt werden kann, ob sich auf einer veränderten Oberfläche Ablagerungen ansammeln.

Es wurden eine Reihe von Versuchen mit einer Calcium-Sulphat-Lösung als Betriebsmittel durchgeführt. Die Betriebsbedingungen, d.h. eine Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 0.3 m/s und eine maximale Oberflächentemperatur von 90°C, waren ähnlich wie die in der Membran-Destillation-Entsalzungsanlage.

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass

- i) die Zunahme der Oberflächenrauigkeit eine signifikante Abnahme des Keimbildungs-Korrektur-Faktors (ϕ) verursacht. Als Folge davon wird erwartet, dass die Foulingrate aufgrund der Senkung des Energieniveaus zur Kristallbildung zunimmt,

- ii) die an den Querrillen erzeugten Wirbel sorgen dafür, dass die Adhäsionskräfte zwischen den Kristallen und der Oberfläche überwunden werden,
- iii) der Ablagerungsprozess von den sich ändernden Eigenschaften der Oberflächenenergie stark beeinflusst wurde. In dieser Arbeit wurde vor allem die Elektronengeberkomponente (γ_2^-) der Beschichtungen untersucht. Eine anfänglich niedrigere Foulingrate und eine längere Induktionszeit waren die Hauptmerkmale der Beschichtungen, die einen höheren γ_2^- -Wert aufweisen.

Ebenso wurde ein neues Kriterium entwickelt, welches vorhersagt, ob sich auf einer modifizierten Oberfläche Ablagerungen ansammeln. Dabei hängt die Wechselwirkungsenergie sehr stark von der Lewis Säure-Basis-Energie ab, während die Wirkung der Lifshitz-van der Waals-Energie gering ist. Die Zuverlässigkeit und die Genauigkeit des neuen Kriteriums wurden durch die experimentellen Ergebnisse sowohl in dieser Arbeit als auch in früheren Arbeiten bestätigt.

Schließlich wurden die zwei besten Beschichtungen für Feldversuche ausgesucht und in einem Plattenwärmeübertrager in zwei aufeinanderfolgenden Phasen eingesetzt. Obwohl in beiden Phasen keine Spur von Ablagerungen zu beobachten war, löste sich in der ersten Phase, im Bereich des Ein- und Ausgangs des Wärmeübertragers und an den Kontaktpunkten zwischen den Platten, die Beschichtung ab. In der zweiten Phase wurde jedoch eine dünnere Beschichtung auf eine rauere Oberfläche angebracht, was zu einer besseren Haftung führte.

TABLE OF CONTENTS

1. INTRODUCTION	1
1.1 Short Description of the MEDESOL Project	1
1.2 Heat Exchanger Fouling	3
1.2.1 Fouling mechanisms	5
1.2.2 Crystallization fouling on heat transfer surfaces	6
1.2.3 Mitigation techniques	8
1.3 Research Objectives	9
1.4 Scope of Present Study	9
2. LITERATURE REVIEW	11
2.1 Surface Modification Approaches to Mitigate Fouling	11
2.1.1 Surface geometry modifications	11
2.1.1.1 Roughened surfaces	12
2.1.1.2 Structured surfaces	13
2.1.2 Surface treatment through alteration of surface energy	14
2.1.2.1 Surface energy concept	14
2.1.2.2 Intermolecular interaction energies	19
2.1.2.3 Effect of different surface properties on fouling mechanisms	23
2.1.2.4 Fouling models with consideration of surface energy properties	27
3. EXPERIMENTAL SET-UP AND PROCEDURE	33
3.1 Experimental Apparatus	33
3.1.1 Test rig	33
3.1.2 Heat transfer specimen	35
3.1.3 Data acquisition and reduction	36
3.2 Surface Characterizations	37
3.2.1 Surface roughness	37
3.2.2 Contact angle	38
3.2.3 Surface energy	39
3.3 Experimental Procedure	40
3.3.1 Test solution and preparation procedure	40

Table of Contents

3.3.2 Clean and fouling heat transfer coefficients	42
3.3.3 Determination of basic fouling parameters	42
3.3.4 Error analysis	44
3.3.5 Matrix of operating conditions	45
4. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION	47
4.1 Alteration of Surface Geometry	47
4.1.1 Fouling of roughened surfaces	47
4.1.1.1 Investigation of various roughened surfaces	47
4.1.1.2 Effect of contact angle on fouling mechanisms	50
4.1.2 Fouling of structured surface geometries	56
4.1.2.1 Heat transfer over grooved surfaces	57
4.1.2.2 Clean heat transfer coefficient	58
4.1.2.3 Fouling of grooved surfaces	60
4.1.2.4 Effect of groove dimensions on fouling mechanisms	62
4.2 Alteration of the Surface Energy Related Properties	64
4.2.1 Surface characterizations	64
4.2.1.1 Coating composition and preparation	64
4.2.1.2 Physical surface properties	65
4.2.1.3 Resistance of coatings to abrasion and corrosion	68
4.2.2 Fouling investigation of modified surfaces	69
4.2.2.1 Solvent/water based coated surfaces	69
4.2.2.2 Electroless Ni-P coated surfaces	70
4.2.2.3 Nano-structured coated surfaces	71
4.2.3 Post-fouling analysis of the deposit layer on modified surfaces	75
4.2.4 Influence of surface energy on fouling propensity	79
4.2.5 Reproducibility of fouling propensity	86
5. THEORETICAL STUDY	88
5.1 Validation of the Previous Surface Energy Fouling Models	88
5.2 A New Simplified Surface Energy Fouling Criterion	90
5.3 Validation of the New Surface Energy Fouling Criterion	95
6. FIELD INVESTIGATION OF COATED SURFACES	102

6.1 Heat Exchanger Specifications	102
6.2 Examination of the Modified Surfaces in the MEDESOL-I Prototype	103
7. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK	109
7.1 Conclusions	109
7.1.1 Alteration of the surface geometry	109
7.1.2 Alteration of the surface energy related properties	110
7.2 Future Work	113
LIST OF REFERENCES	114
APPENDIXES	125
LIST OF PUBLICATIONS	131