

Summary

Membrane distillation is a thermally driven separation process. Recent interest has been observed in the technology due to its unique features such as mild operating temperature, allowing the use of waste heat as driving force, ultimate rejection for non-volatile components, low operational pressure which allows the use of cheap, plastic modules, that do not suffer from corrosion. This thesis is dedicated almost exclusively to the modelling of the process. It covers the selection, development and calibration of lab-scale as well as full-scale models of the most popular membrane distillation configurations studied and used today.

In chapter 1 the general introduction to this thesis is done, starting with introduction to the topic, problem statements and the objectives of this research. Then an outline of the roadmap through this thesis is presented.

Chapter 2 deals with a literature overview on the current modelling approaches and practices concerning MD. Key lab- and full-scale studies are briefly discussed and the general gaps in the literature are outlined. The most used sub-models for heat and mass transfer inside the channels and membranes are discussed as well as their practical applicability, limitations and input parameters.

Chapter 3 deals with calibration and analysis of a typical lab-scale direct contact membrane distillation (DCMD) model. The chapter presents a methodology for the calibration of an arbitrary channel spacer in terms of heat and mass transfer. Further, different mass transfer models are compared in their predictive power for seven different membranes.

Chapter 4 describes a methodology for scaling up of a DCMD model from lab-scale and applying it to a full-scale module geometry, without using calibration parameters on full-scale. The chapter reveals a novel direct measurement as well as model extension dealing with the membrane compaction, which was demonstrated to have a large impact on the heat and mass transfer properties

of the membrane. Thorough validation reveals that the model has an excellent fit to the experimental data.

In chapter 5, the DCMD model from chapter 3 is extended to an air gap membrane distillation (AGMD). Novel, but simple measurement techniques are presented in order to measure for the first time the previously unknown parameters in the gap compartment. Experimental validation shows an excellent predictive power of the newly developed model. Further in this chapter an experimental comparison between DCMD and AGMD was performed for two modules with otherwise identical geometry and the same manufacturer. It was demonstrated that contrary to popular beliefs, AGMD modules can have higher fluxes on full-scale compared to DCMD.

Chapter 6 is dedicated to demonstrating the in-house tool developed in this thesis for process and module optimization of membrane distillation modules and systems. First, modules from the three major MD configurations are optimized in terms of geometry and operational conditions. The major limitation factors in each of the configurations is outlined. During the second part of this chapter, complete systems are designed for several cases and scenarios. A thorough economical analysis is performed and the economical aspects of MD are discussed.

In chapter 7 general conclusions are presented. The thesis is summarized and recommendations for future research are given.

Samenvatting

Membraandestillatie is een thermisch aangedreven scheidingsproces. De technologie wordt de laatste jaren uitgebreid bestudeerd vanwege zijn unieke kenmerken, zoals een milde operationele temperatuur, waardoor het gebruik van restwarmte als drijvende kracht mogelijk wordt, volledige retentie van niet-vluchtige componenten en een lage operationele druk, die het gebruik van goedkope, plastic modules die niet corrosiegevoelig zijn toestaat. Dit proefschrift is bijna uitsluitend gewijd aan het modelleren van het membraandestillatie proces. Er is aandacht besteed de selectie, ontwikkeling en kalibratie van zowel lab- als full-scale modellen van de meest gebruikte en onderzochte membraandestillatieconfiguraties.

Hoofdstuk 1, de algemene inleiding van dit proefschrift, bevat een inleiding tot het onderwerp en zijn probleemstelling en beschrijft de doelstellingen van het onderzoek. Vervolgens wordt aan de hand van een roadmap een overzicht van dit proefschrift gepresenteerd.

Hoofdstuk 2 bevat een literatuuroverzicht van de huidige modelleerbenaderingen en -praktijken met betrekking tot MD. Toonaangevende lab- en full-scale studies worden kort besproken en de grote hiaten in de literatuur worden beschreven. De meest gebruikte submodellen voor warmte- en massa-overdracht in kanalen en membranen worden besproken, evenals hun praktische toepasbaarheid, beperkingen en invoerparameters.

Hoofdstuk 3 beschrijft de kalibratie en analyse van een typisch laboratoriumschaal DCMD model. Het hoofdstuk presenteert een methodologie voor de kalibratie van een willekeurige kanaalspacer in termen van warmte en massa-overdracht. Verder worden verschillende massa-overdracht modellen vergeleken op hun voorspellende kracht voor zeven verschillende membranen.

Hoofdstuk 4 beschrijft een methode voor het opschalen van een DCMD model startend van laboratoriumschaal en past deze toe op een full-scale module geometrie, zonder gebruik te maken van kalibratieparameters op full-scale.

Het hoofdstuk onthult zowel een innovatieve directe meting als een modelextensie ter behandeling van de samendrukbaarheid van het membraan. Voor beiden wordt aangetoond dat ze een grote invloed hebben op de warmte- en massaoverdrachteigenschappen van het membraan. Uit een grondige validatie blijkt dat het model een uitstekende fit vertoont met de experimentele data.

In hoofdstuk 5 wordt het DCMD model uit hoofdstuk 3 uitgebreid naar een air gap membraan distillatie (AGMD). Daarvoor worden nieuwe, maar eenvoudige meettechnieken voorgesteld die de onbekende parameters in de air gap kunnen meten. Experimentele validatie toont een uitstekende voorspellende kracht van het ontwikkelde model. Verder bevat dit hoofdstuk een experimentele vergelijking tussen een DCMD en een AGMD module met identieke geometrie en van dezelfde fabrikant. In tegenstelling tot wat algemeen aangenomen wordt, blijkt dat AGMD modules op volle schaal hogere fluxen hebben dan DCMD.

Hoofdstuk 6 is gewijd aan het demonstreren van de in-house ontwikkelde tool die gebruikt kan worden voor proces- en module optimalisatie van membraan distillatiemodules en -systemen. Ten eerste worden modules uit de drie grote MD configuraties geoptimaliseerd in termen van geometrie en operationele omstandigheden. De belangrijkste beperkende factoren in elk van de configuraties worden geschetst. In het tweede deel van dit hoofdstuk worden volledige systemen ontworpen voor verschillende gevallen en scenarios. Een grondige economische analyse wordt uitgevoerd en de economische aspecten van MD worden besproken.

In hoofdstuk 7 worden de algemene conclusies gepresenteerd. Het proefschrift wordt samengevat en aanbevelingen voor toekomstig onderzoek worden gegeven.