Eindrapport

Project: Forward Osmosis Membranes and Modules (FOMM)

31-08-2021

Content

[1. Gegevens project 3](#_Toc83042188)

[2. Inhoudelijk eindrapport 4](#_Toc83042189)

[2.1 Samenvatting 4](#_Toc83042190)

[2.2 Inleiding 5](#_Toc83042191)

[2.3 Doelstellingen 7](#_Toc83042192)

[2.4 Werkwijze 8](#_Toc83042193)

[2.5 Resultaten 9](#_Toc83042194)

[2.6 Discussie 11](#_Toc83042195)

[2.7 Conclusie en aanbevelingen 12](#_Toc83042196)

[3. Uitvoering van het project 13](#_Toc83042197)

[3.1 Technische en organisatorishe problemen 13](#_Toc83042198)

[3.2 Wijzigingen ten opzichte van project plan 13](#_Toc83042199)

[3.3 Wijzigingen tussen begroting en werkelijk gemaakte kosten 13](#_Toc83042200)

[3.4 Kennis oversrprijding en PR uit confidentiële eindrapport incl ISPT activiteiten, TU/e artikelen 13](#_Toc83042201)

[4. Colofoon 14](#_Toc83042202)

# Gegevens project

Projectnummer: TEE11686

Projecttitel: Forward Osmosis Membranes and Modules: development and applications

Acronym: FOMM

Penvoerder: BLUE-tec

Medeaanvragers: Darling Ingredients, TU/e, ZLTO, AVEBE, Wolbers Mesttechniek, ISPT

Projetperiode: 3 oktober 2016 – 1 mei 2021

# Inhoudelijk eindrapport

## Samenvatting

Het Joint Industrial Project (JIP) “Forward Osmosis Membranes and Modules: development and applications” (FOMM) heeft als doel het ontwikkelen en optimaliseren van forward osmose (FO) membrane and modules en het testen van deze technologie op voor het concentreren van industriële vloeistofstromen op bench scale.

Bij Forward Osmose wordt water aan een vloeibare stroom onttrokken door middel van een semipermeabel membraan. Aan de ene kant van het membraan bevindt zich de te concentreren stroom en aan de andere kant een oplossing met een hogere osmotische druk, dan deze te concentreren stroom, de zogenaamde draw solution, . Door het verschil in osmotische druk gaat water van de voedingsstroom naar deze draw solution, waardoor de draw solution verdund en de voedingsstroom geconcentreerd wordt. Dit concentratieproces vindt plaats zonder dat er mechanische druk wordt toegepast en kan veel verder geconcentreerd worden dan met klassiek reverse osmose mogelijk is.

Ondanks de potentieel interessante toepassingsmogelijkheden, met name de mogelijkheden van milde concentratie in de voedingsmiddelen industrie, kent FO tot op heden nog maar weinig toepassingen. Een van de bottlenecks in FO toepassingen is de relatieve lage membraanfluxen die bereikt worden met de momenteel verkrijgbare FO membranen. Ook de commercieel verkrijgbare moduulconcepten zijn niet geschikt voor de concentratie van vloeistofstromen met een hogere viscositeit of aanwezigheid van zwevend materiaal.

In het FOMM project zijn de volgende zaken onderzocht:

1. Ontwikkeling van een FO membraan met hogere fluxen en betere selectiviteit dan de huidige commercieel verkrijgbare membranen. Dit onderzoek is uitgevoerd met TU/e in de lead.
2. Ontwikkeling van nieuwe moduul configuraties voor FO processen die ook meer viskeuze of stromen met zwevend materiaal kan concentreren. Dit onderzoek is uitgevoerd door BLUE-tec
3. Het daadwerkelijk concentreren van voedingsstromen uit de industrie. Hiervoor zijn bench scale installaties gebruikt die door BLUE-tec gerealiseerd zijn.
   1. Concentratie van “infant milk” door Nutricia
   2. Concentratie van bloedserum door Darling Indgredients
   3. Concentratie van aardappelvrucht water door AVEBE
   4. Concentratie van mestwater door ZLTO
   5. Concentratie van champignonwater door Wolbers in samenwerking met ZLTO
4. Op basis van de bench scale proeven zijn voor de verschillende applicaties de business cases doorgerekend.

Uit het FOMM onderzoek is gebleken dat de combinatie van een verbeterd FO membraan met een nieuw type module configuratie openingen biedt voor met name toepassingen in de voedingsmiddelen industrie. Met name door de mogelijkheid om bij lage temperaturen vergaand te kunnen concentreren maakt het mogelijk om nieuwe en hoog waardige concentraten te maken. Ook zijn er mogelijkheden voor het produceren van mestconcentraten bij de mestverwerking. Aandachtspunt bij FO membranen blijft de zogenaamde reverse solute flux (diffunderen van de draw solution in de voedingsoplossing). Uit testen van de TU/e bleken de nieuwe membranen met electro-spin support en nieuwe ontwikkelde active layer goede aanknopingspunten voor te zijn. In combinatie met de nieuw ontwikkelde moduultype bestaan er goede toekomstige mogelijkheden voor milde concentratie met FO.

## Inleiding

Forward osmosis (FO), ook wel directe osmose, heeft het potentieel om schoon water te genereren en tegelijkertijd het hergebruik van waardevolle componenten in afvalstromen te verbeteren (FO; figuur 1). Het is echter een technologie die nog in de kinderschoenen staat voor industriële toepassing. FO gebruikt spontane waterdiffusie over een semi-permeabel membraan. FO haalt water uit processtromen met een lagere osmotische druk in een trekoplossing met een hogere osmotische druk; aldus effectief scheidend het water van zijn opgeloste en opgeloste componenten. FO kan zeer vervuilende of viskeuze waterstromen behandelen, vanwege het lage vervuilingspotentieel. Deze stromen zijn alomtegenwoordig in meerdere industriële processen bij bedrijven variërend van chemische bedrijven tot voedsel-, zuivel- en dierlijke industrieën (bijv. sap, kaas, wei, mest). Voor dergelijke voedingsstromen is de efficiëntie van RO- en andere membraantechnologieën te laag vanwege enorme vervuilingsproblemen en beperkte concentratiefactoren. Naast minder vervuiling is het sterke voordeel van FO de hoge energie-efficiëntie en bijgevolg een lager energieverbruik voor concentratie van voedingsstromen. De energievraag van verdampers en distilleerders wordt tot een minimum beperkt. FO vermijdt voorbehandelingsstappen zoals nanofiltratie (NF) en ultrafiltratie (UF), die vaak kunnen worden uitgesloten van processen. FO wordt vaak vergeleken met RO, omdat de technologieën gerelateerd zijn. FO gebruikt een osmotisch drukverschil (∆π) als drijvende kracht, terwijl RO een hydraulische drukgradiënt (∆P) toepast over een drukbestendig membraan (figuur 2). Een RO-membraan moet bestand zijn tegen hoge hydraulische drukken (tot 80 bar), maar met FO-membranen geen hydraulische drukgradiënten ervaren. Om de maximale voordelen te realiseren, moeten specifieke FO-membranen onderscheidend worden ontworpen van RO-membranen, in plaats van de nu beschikbare RO-membranen voor FO-toepassing te gebruiken, zoals momenteel vaak wordt gedaan. Dit is gerechtvaardigd gezien het fenomeen concentratiepolerisatie. Met FO dringen water en zout in tegengestelde richting door, terwijl in RO alle permeaatfluxen dezelfde richting volgen. Dit houdt in dat FO wordt geconfronteerd met interne concentratiepolarisatie (ICP), d.w.z. verdunning van de trekoplossing in de membraanondersteuningslaag, terwijl RO wordt geconfronteerd met externe concentratiepolarisatie (ECP), d.w.z. verhoogde componentconcentratie in de grenslaag aan de voedingszijde van het membraan als gevolg van oplossingsretentie. ICP- en ECP-verschijnselen worden geïllustreerd in figuur 3. In de afgelopen jaren zijn aanzienlijke inspanningen geleverd voor de ontwikkeling van FO-membranen en met name open, zeer poreuze steunen met behulp van fasescheiding (meest toegepast proces voor de productie van commerciële poreuze ondersteuningsmembranen) (bijv. Alsvik, 2013; Zhang, 2010). Toch blijft de belangrijkste uitdaging voor FO-membranen de fabricage van een poreuze ondersteuning die het effect van ICP vermindert (Ghosh, 2009). Door elektrospinning kunnen hydrofiele geoptimaliseerde steunlagen met een zeer hoge porositeit worden geproduceerd die nog steeds de toepassing van een dunne selectieve coatinglaag mogelijk maken (Bui, 2011). Via deze route kan de negatieve bijdrage van ICP aan de algehele procesprestaties worden geminimaliseerd. Een nieuwe ondersteuningsstructuurparameter om het ICP te regelen is de Shape Factor (S) die wordt gedefinieerd als (S=(τ(l)/ε; met τ = de tortuositeit; l = de membraandikte en ε = de porositeit. Manickam (2015) bewees echter dat de huidige methoden om de intrinsieke S-factor te bepalen beladen en onnauwkeurig zijn; de theoretische waarde kan tot een factor bijna 15 afwijken van de effectieve S-factor. Belangrijke factoren naast de morfologische parameters zijn de hydrofobiciteit en lading (Ghosh, 2009). Ontwikkeling van elektrospinning steunlagen is daarom onderdeel FOMM.

Figure 1 Working principle of FO

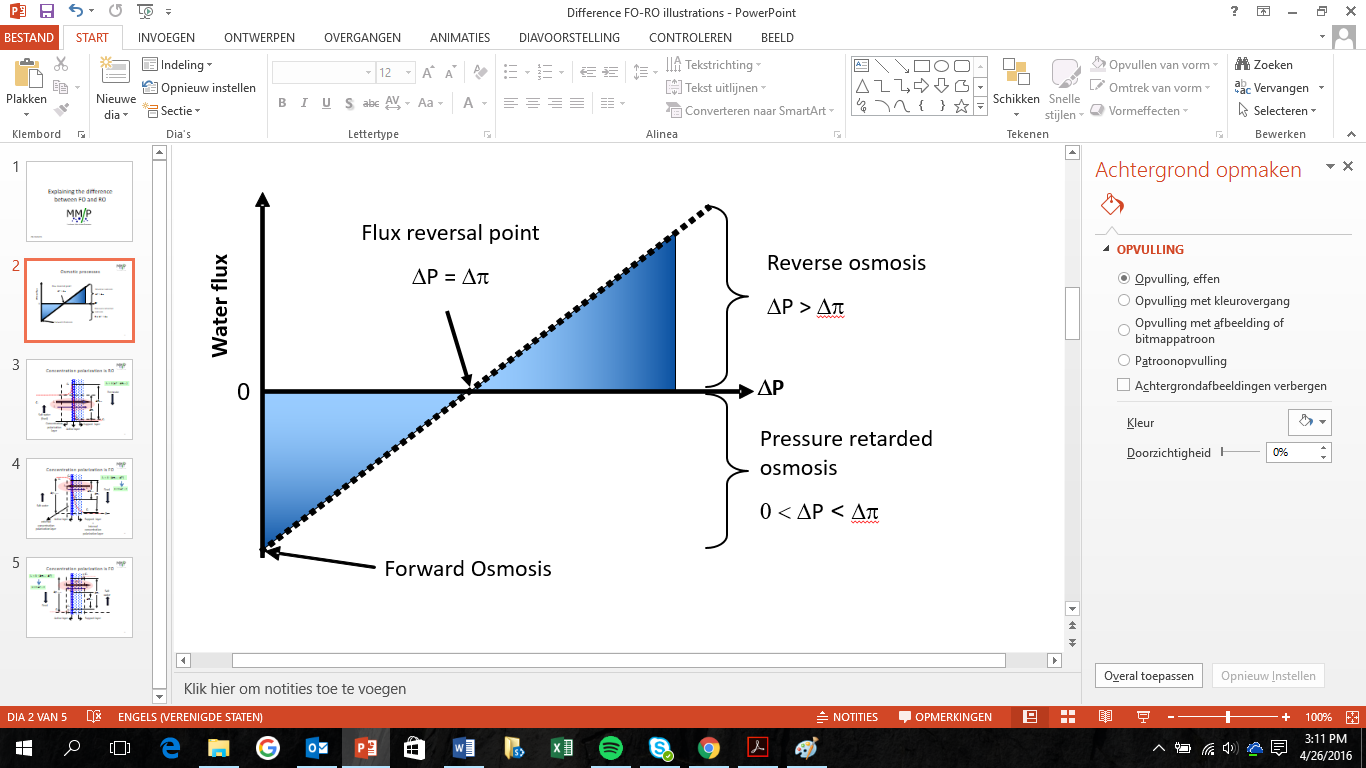


Figure 2 Water flux over a semi-permeable membrane as a consequence of applying pressure on the feed stream side.



Figure 3 Concentration polarization in FO (top) and RO (bottom). In FO ICP *in the support* plays a crucial role, while in RO, ECP *at the feed side* is critical. This essential difference requires distinctively different membranes

Kortom, FO is in staat om operationele en energiekosten te verlagen en het vermogen om moeilijke processtromen (hoge troebelheid, hoge viscositeit en/of temperatuurgevoelig) aan te kunnen en waardevolle hulpbronnen uit deze stromen terug te winnen, te verbeteren. Dit blijkt uit de resultaten van een voormalig EAP-project van BLUE-tec, waarbij de efficiëntie van FO-behandeling werd getest op vitamine C-water, kaaswei, gemeentelijk afvalwater en geproduceerd water uit gasvelden. Aangezien de druk- en/of temperatuurveranderingen van de voerstroom worden omzeild (zoals het geval is bij bijvoorbeeld verdamping of distillatie), blijft de consistentie van de voederstromen ongewijzigd. Dit is van bijzonder belang voor (de ontwikkeling van nieuwe) producten en ingrediënten in de voedings- en diervoedersector, bijvoorbeeld bij de kaasproductie of de verwerking van eiwitten en biologische producten. Het huidige project gaat verder waar het EAP-project is geëindigd en breidt het operationele venster van FO uit. De belangrijkste focus in het huidige FOMM-project ligt op de voedings-, dranken- en landbouwsector, omdat deze industrieën te maken hebben met zeer vervuilende processtromen, mogelijk in combinatie met bijvoorbeeld hogere viscositeiten (Nutricia), die milde behandelings- en ontwateringsprocessen vereisen om verslechtering van de voedercomponenten als gevolg van de heersende procesomstandigheden te voorkomen. Extreem hoge concentratiefactoren kunnen worden bereikt door gebruik te maken van trekoplossingen tot 300 g zouten/l, waarvoor vervolgens MD kan worden gebruikt om de trekoplossingen terug te winnen (zoals bewezen in het voormalige EAP-project). In tegenstelling tot het voormalige EAP-project, waar commerciële "FO"-membraanmodules werden gebruikt om het principiële bewijs te tonen, omvat de hoofdactiviteit van FOMM het ontwerp, de bouw en de toepassing van geoptimaliseerde FO-membranen en modules in echte industriële processtromen, bestaande uit hoge belastingen van zwevende vaste stoffen en een hoge viscositeit. Eindgebruikers die deelnemen aan FOMM vertegenwoordigen de voedings- en drankensector en de landbouwsector en de implementatie van FO-technologie kan worden gereproduceerd en uitgebreid naar andere industriële stromen. Om het volledige operationele venster van FO te benutten, worden parallelle tests en toepassingen uitgevoerd door BLUE-tec met stromen die chemisch vervuilend zijn of extreme kenmerken hebben. De specifieke voedingsstroom kenmerken detailleren het ontwerp van membranen en modules. Massatransferstudies en het direct bijbehorende moduleontwerp worden uitgevoerd in nauwe samenwerking met de TU/e, die een modelleringsstudie zal uitvoeren. Het opschalen van modules en moduleproductie naar bench scale, wat ook deel uitmaakt van het project, resulteert in economisch haalbare behandelingssystemen. Om verder te gaan dan bestaande prestaties, parallel aan modulebouw met bestaande membranen en de industriële testen, zullen FO-membranen van de volgende generatie aan de TU/e worden ontwikkeld met behulp van elektrospinning, wat veelbelovend is, maar slechts in beperkte mate onderzochte technologie voor poreuze ondersteuningsvoorbereiding. Aan het einde van het project zullen deze membranen van de volgende generatie worden gebruikt in de moduleproductie.

## Doelstellingen

Doestelling van het project is het ontwikkelen een FO-membraanmodule die later opgeschaald kan worden en op grote schaal kan worden toegepast bij het ontwateren van industriële proceswateren,inclusief complexe, zeer vervuilende en viskeuze media. Het doel is om een doorbreekbare, energie-efficiënte technologie beschikbaar te hebben met geoptimaliseerde FO-membraanmodules voor industrieën, momenteel met behulp van energieverslindende concentratie- en scheidingstechnologieën. Aan het einde van het project is er een duidelijk zakelijk vooruitzicht op een goed functionerend, up-scalable FO module productiesysteem en de toepassing ervan, operationeel venster en potentieel voor het ontwateren van industrieel, zeer vuil proceswater en zeer viskeuze vloeistoffen is bewezen.

**Het eerste doel is het ontwikkelen, ontwerpen en bouwen van FO-modules die industrieel toepasbaar zijn voor het concentreren en scheiden van complexe vloeistoffen.** De geometrie van de modules (bijv. buisvormige, holle vezels of platen) moet zodanig zijn dat deze de optimale functionaliteit hebben in termen van massaoverdracht en fluxen voor proceswaterbehandeling. In eerste instantiezijn de gebruikte membranen in de handel verkrijgde FO-membranen. In de latere fase worden de volgende generatie membranen die aan de TU/e zijn ontwikkeld, toegepast en gebenchmarkt ten opzichte van de commerciële membranen.

**Het tweede doel is het ontwikkelen van proefbehandelingsinstallaties op proefschaal, om de FO-modules te testen met behulp van echte industriële processtromen.** Om dit te bereiken worden de procesfeedstromen van eindgebruikers AVEBE, Darling Ingredients, Nutricia en Wolbers Mesttechniek als representatieve testcases genomen. Deze voederstromen zullen de toepasbaarheid van FO aantonen in sterk vervuilende waterstromen afkomstig uit de voedingsmiddelen - en drankenindustrie. Deze faciliteiten hebben locaties voor proeftests beschikbaar die een hoge mate van flexibiliteit en aanpassing aan het FO-systeem mogelijk maken. BLUE-tec zal samen met de eindgebruikers de systemen ontwerpen en bedienen. De resultaten worden met alle projectpartners geëvalueerd en direct vertaald naar de werking en het ontwerp van de volgende generatie membranen door de TU/e.

**Het derde doel is het ontwerpen en valideren van de economische haalbaarheid van grootschalige FO-moduleproductie en deze beschikbaar te stellen voor verschillende industrieën**. Om deze Blue-tec op te zetten, zullen hun activiteiten en netwerk worden uitgebreid naar zowel de exploitatie van membraanproductie als modulebouw, waardoor de FO-technologie beschikbaar wordt voor de verschillende industrieën. Deze industrieën zullen extra inkomsten genereren door afvalstromen van geringe waarde in waardevolle processtromen te concentrating of door temperatuur - en afschuifgevoelige productstromente concentrating , beide opeen energie-efficiënte manier.

## Werkwijze

Het project is uitgevoerd op basis van een aantal van te voren vastgestelde werkpakketten. Een overzicht van deze werkpakketten staat hieronder weergegeven:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ***WP*** | ***Beschrijving*** | ***Deelnemers*** | ***Resultaat*** |
| ***1*** | Feedstreamanalyse en stel criteria in voor moduleontwerp. | **BLUE-tec (leader)**, TU/e, AVEBE, Darling Ingredients, Nutricia, Wolbers Mesttechniek, ZLTO | Feed stream analyse, ontwerp membraan module, concept ontwerp. |
| ***2*** | FO membraan module ontwikkeling. | **BLUE-tec (leader)**, TU/e, AVEBE, Darling Ingredients, Wolbers Mesttechniek, Nutricia, ZLTO | Membraanmodules uit bestaande en in een later stadium nieuw ontwikkelde membranen. Membraanmodule conceptueel ontwerp voor FO. |
| ***3*** | Ontwikkeling van fo-membranen van de volgende generatie. | **TU/e (leader)**, BLUE-tec, CUT and TNO (subcontractors) | Concept voor elektrospunsteun. Leveringstestmodule aan eindgebruiker voor benchmarking. Literatuurstudie membranen en modules. |
| ***4*** | Ontwerp, constructie en validatie van een flexibele FObench scale unit. | **BLUE-tec (leader)**, TU/e, AVEBE, Darling Ingredients, Nutricia, Wolbers Mesttechniek, ZLTO | Gebouwde bench scale installatie met geïntegreerde FO-module en gebruikershandleiding. |
| ***5*** | FO bench scale testen met meerdere industriële feeds. | **AVEBE, Darling Ingredients, Wolbers Mesttechniek, ZLTO, Nutricia (subcontractor) (leaders),** BLUE-tec | Testplan en testresultaatrapport. |
| ***6*** | Kosten- en energiereductieanalyse en prestatie-evaluatie en opschaping. | **BLUE-tec (leader)**, TU/e, AVEBE, Darling Ingredients, Nutricia, Wolbers Mesttechniek, ZLTO, | Technisch rapport opschaling, energie-evaluatie, CBA, conceptueel ontwerp voor commerciële membraanmodulebouw en fabricage. |
| ***7*** | Projectmanagement en verspreiding. | **ISPT (leader),** BLUE-tec, TU/e | Sharepoint constructie, notulen vergaderingen, alle deliverables en eindrapport, verspreidingsplan, tijdschriftpublicaties, nieuwsberichten, presentaties voor algemeen en wetenschappelijk publiek. |

## Resultaten

Het totale onderzoek kan in drie hoofdcategorieën verdeeld worden.

1. Ontwikkeling van een FO membraan met hogere fluxen en betere selectiviteit dan de huidige commercieel verkrijgbare membranen. Dit onderzoek is uitgevoerd met TU/e in de lead.
2. Ontwikkeling van nieuwe moduul configuraties voor FO processen die ook meer viskeuze of stromen met zwevend materiaal kan concentreren. Dit onderzoek is uitgevoerd door BLUE-tec
3. Het daadwerkelijk concentreren van voedingsstromen uit de industrie. Hiervoor zijn bench scale installaties gebruikt die door BLUE-tec gerealiseerd zijn.
   1. Concentratie van “infant milk” door Nutricia
   2. Concentratie van bloedserum door Darling Indgredients
   3. Concentratie van aardappelvrucht water door AVEBE
   4. Concentratie van mestwater door ZLTO
   5. Concentratie van champignonwater door Wolbers in samenwerking met ZLTO
4. Op basis van de bench scale proeven zijn voor de verschillende applicaties de business cases doorgerekend.

Door TU/e is nieuw FO membraan ontwikkeld. De focus heeft hierbij gelegen op de ontwikkeling van een nieuw soort support layer die zeer open en dun. Deze support layer is geproduceerd op basis van elektro-spin technologie. In eerste instantie is dit gedaan op laboratoriumschaal om de juiste condities voor het elektro-spinnen vast te stellen. Daarna zijn op een kleine electro-spin machine support layers voor FO membranen geproduceerd en voorzien van een poly-amide active layer. Het aanbrengen van de actieve layer op een PES support bleek problematisch. Door gebruik te maken van een ander type polymeer voor de support layer was het mogelijk stabiele FO membranen te produceren. De FO flux of deze membranen bleek vergelijkbaar met de commerciële FO membranen, maar de reverse solute flux bleek circa 10 maal kleiner te zijn. Dit laatste is een belangrijke eigenschap om FO membranen commercieel toepasbaar te maken. Diverse testen hebben uitgewezen dat electro-spin technologie een verbetering te geven van de membraanflux en/of reverse solute flux ten opzichte van de huidige commercieel verkrijgbare membranen. Ook blijkt de technologie eenvoudig opschaalbaar.

BLUE-tec heeft onderzoek gedaan naar het ontwikkelen van andere moduulconcepten dan de huidig gangbare spiraalwikkel modules voor FO. In eerste instantie is veel onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van buisvormige FO membranen. Echter door de zeer dunne support laag bleek het niet goed mogelijk om stabiele buisvormige membranen te produceren. Vervolgens is de ontwikkeling verschoven naar plate&frame modules die ondergedompeld in de te concentreren vloeistof geplaatst wordt. Het principe is hierbij vergelijkbaar zoals bij submerged MBR’s wordt toegepaste. Membraan headers en frames zijn voor dit project door middel van 3D-printing geproduceerd en uiteindelijk is succesvol een submerged FO moduele van 1 m2 geproduceerd en getest in een speciaal daarvoor aangepaste bench scale installatie.

De FO technologie is bij Nutricia op bench scale getest om “infant milk” te concentreren als voor-concentratie voor het uiteindelijke sproeidroog proces. De testen zijn uitgevoerd met verschillende formuleringen “infant milk” en bij verschillende temperaturen. FO bleek goed in staat om “infant milk” van 10w% tot 60% te concentreren. Op basis van business case berekeningen lijkt FO een mogelijk interessante technologie voor het concentreren van “infant milk”. Het lekken van de draw solution naar de voedingsoplossing is wel een punt van aandacht.

Bij Darling Indgredients is FO technologie op bench scale getest voor de concentratie van bloedserum. Uit de testen is gebleken dat FO moeilijk toepasbaar is voor het concentreren van bloed serum. Vergelijking met de huidig manier van concentratie (en diafiltratie) met behulp van nano-filtratie membranen is gebleken dat FO/RO concept economisch niet aantrekkelijk is voor de concentratie van bloedserum.

Bij AVEBE is FO technologie op bench scale getest voor de concentratie van aardappelvruchtwater. Aardappelvruchtwater kan met de combinatie FO/RO succesvol een factor 15 geconcentreerd worden. De membraanflux was in de range of 2 – 3 l/m2.h. Met name bij het toepassen va (nog door te ontwikkelen) tubulaire FO membranen zou verder concentratie van aardappelvruchtwater mogelijk moeten zijn, wat tot een positieve business case zou kunnen leiden.

ZLTO heeft gekeken naar de toepassing van FO technologie voor de concentratie van de dunne fractie van mest. FO blijkt in combinatie met nieuwe methoden voor draw solution recovery een interessant techniek te zijn voor de concentratie van de dunne fractie van vergist mest. Op basis van business case berekeningen blijkt dat door toepassen van FO de het poorttarief voor FO met circa € 3,50 verlaagd kan worden.

Bij Wolbers is op bench scale FO getest naar de concentratie water afkomstig uit een luchtwasser van ammoiniak lucht uit een varkensschuur. De testen zijn uitgevoerd met een door Blue-tec BV ontworpen flat sheet module. Het doel was om te kijken naar de maximale concentratie van het water en productie van loosbaar water. Door de relatief hoge zoutconcentratie in het te concentreren water lijkt de technologie niet geschikt voor dit soort vloeistoffen.

## Discussie

Forward Osmose technologie had diverse beloftes, zoals:

* Verminderde vervuiling doordat FO een drukloos proces is.
* Laag energieverbruik
* Hoge selectiviteit van de membranen

Uit het onderzoek is gebleken dat verminderde vervuiling niet aantoonbaar optreedt. Uit recent onderzoek is tevens gebleken dat de membraanflux vooral bepalend is voor de vervuiling. Bij FO processen zijn de membraanfluxen erg laag, waardoor er minder vervuiling optreedt.

Energieverbruik bij FO processen kan laag zijn wanneer er een “gratis” draw solution aanwezig is. Wanneer de draw solution echter opgewerkt moet worden met een andere technologie, zoals RO of een indamper, dan is het netto-energieverbruik hoger dan het zelfstandige RO of indampproces.

De selectiviteit van FO-membranen is een belangrijk punt van aandacht. De huidige commerciële membranen hebben een zogenaamde reverse solute flux van ca. 0,2 g/l. Dit betekent dat er relatief veel zout bij de draw solution gesuppleerd moet worden, wat hoge kosten met zich mee brengt. Daarnaast wordt de feed stroom vervuild met het zout uit de draw solution, wat voor toepassingen in de levensmiddelenindustrie vaak ongewenst is. Ten slotte leidt de zout lek tot een sterke toename van alle opgeloste componenten van uit de feed solution naar de drawsolution, waarbij de concentraties in de draw solution nog hoger kunnen worden dan in de (geconcentreerde) feed solution ten gevolge van concentratiepolarisatie. De reden voor deze accumulatie in de draw solution is de geringe selectiviteit van het FO membraan ten opzichte van het draw solution recovery systeem (RO, indamper).

Bovengenoemde gevonden eigenschappen van de huidige FO membranen leidt tot de volgende conclusies:

* Nieuwe generatie FO membranen moeten een veel hogere selectiviteit hebben dan de huidige commerciële membranen. Het nieuwe ontwikkelde FO membraan bij de TU/e heeft een RSF die een factor 10 lager ligt dan bij de huidige FO membranen.
* Hoge membraanflux in FO is niet voordelig om de fouling te verminderen ten opzichte van RO. Focus voor FO membranen zou moeten liggen op een acceptable flux (10 – 15 l/m2.h) tegen lage membraankosten.
* Het energieverbruik voor FO processen ligt over het algemeen hoger dan directe RO of indamping. De beste toepassingsmogelijkheden voor FO liggen in de “koude”concentratie in de voedingsmiddelen industrie. Ook voor toepassingen waar al een draw solution voor hand is zijn goede mogelijkheden.

De potentiële energiereductie bij de “koude”concentratie in de levensmiddelenindustrie draagt bij aan de aan de doelstellingen van de regeling om tot een vermindering van het energie verbruik te komen. De koude concentratie van voedingsmiddelen leidt tot nieuwe producten, waarvan momenteel het marktvolume nog onbekend is. Vanuit dit gegeven is het erg moeilijk om een potentiële energiereductie aan te geven voor deze toepassing.

## Conclusie en aanbevelingen

Uit het FOMM onderzoek is gebleken dat de combinatie van een verbeterd FO membraan met een nieuw type module configuratie openingen biedt voor toepassingen in de voedingsmiddelen industrie. Met name door de mogelijkheid om bij lage temperaturen vergaand te kunnen concentreren maakt het mogelijk om nieuwe en hoog waardige concentraten te maken. Ook zijn er mogelijkheden voor het produceren van mestconcentraten bij de mestverwerking. Aandachtspunt bij FO membranen blijft de zogenaamde reverse solute flux (diffunderen van de draw solution in de voedingsoplossing). Uit testen van de TU/e bleken de nieuwe membranen met electro-spin support en nieuwe ontwikkelde active layer goede aanknopingspunten voor te zijn. In combinatie met de nieuw ontwikkelde moduultype bestaan er goede toekomstige mogelijkheden voor milde concentratie met FO.

Aanbevolen wordt om verder toepassingen van FO mogelijk te maken, onderzoek vooral gericht wordt op het produceren van met membranen met een superieure selectiviteit, die beter is dan de huidige RO membranen.

# Uitvoering van het project

## Technische en organisatorishe problemen

Er hebben zich geen noemenswaardige technische problemen tijdens het onderzoek voorgedaan. Wel is er een veel beter inzicht gekomen in de technologische beperkingen van het FO proces. Hieruit kan geconcludeerd worden dat toepassingen voor FO alleen aantrekkelijk zijn bij milde concentratie in voedingsmiddelenindustrie, of daar waar al een draw solution voor handen is. Belangrijk hierbij is dat een FO membraan ontwikkeld wordt met superieure selectiviteit. Door de TU/e zijn hier de eerste aanzetten toe gedaan. Bij de ontwikkeling van een dergelijk membraan kan FO zeker goede toepassingen vinden in de voedingsmiddelen industrie of daar waar al een draw solution voor handen is.

Gedurende het project hebben er zich enkele organisatorische problemen voorgedaan. Deze uitdagingen zijn opgelost door activiteiten te verschuiven van partners Wolbers en Avebe naar Blue-tec BV. Dit betrof met name bedrijven van de FO-installatie en begeleiding tijdens de testen op locatie van de partners.

## Wijzigingen ten opzichte van project plan

De werkpakketten beschreven in het projectplan zijn grotendeels uitgevoerd zoals omschreven staan. COVID heeft een grote invloed gehad op de planning en het uitvoeren van de testen op locaties van de verschillende partners met name bij partner Wolbers BV. Membrane module development (WP2) nam door in t begin tegenvallende resultaten bij productie van tubulairen met behulp van elctrronisch lassen meer tijd in beslag en zorgde voor vertraging. Ook door subcontractor CUT gemaakte prototypes voldeden niet. Uiteindelijk is door Blue-tec BV een submerged prototype gemaakt welke getest is bij partner Wolbers.

In verband met COVID zijn presentaties en bijeenkomsten minder geweest, dit is later in t project goed opgepakt in de vorm van digitale meetings. In het project is door Blue-tec een bestaande installatie gereviseerd in plaats van een nieuwe installatie gebouwd.

## Wijzigingen tussen begroting en werkelijk gemaakte kosten

Door penvoerder Blue-tec BV zijn meer kosten gemaakt dan begroot met name in WP 5 om de partners op locatie te ondersteunen bij het uitvoeren van de pilot testen. Daarnaast zijn er meer uren nodig geweest voor module ontwikkeling in WP2.

De door partner Avebe gemaakte kosten zijn een stuk lager dan begroot. Dit betreft met name activiteiten in WP 5. De uitvoering van de testen op locatie zijn met name uitgevoerd door Blue-tec BV volgens projectplan. In verband met de aanleg en opstart van een UF-RO-installatie in Ter Apelkanaal (waardoor energie en water bespaart kan worden) was er in WP 5 van het FOMM-project minder tijd beschikbaar voor de uitvoering en ondersteuning van de proeven met de pilot-installatie. Om deze reden heeft Avebe minder tijd kunnen besteden en heeft Blue-tec meer tijd besteed in WP 5.

Door Partner Wolbers zijn met name in WP 5 minder kosten gemaakt zowel in uren als materialen. Dit is opgevangen door Blue-tec BV ivm kennis van de technologie en noodzakelijke begeleiding op locatie.

Door partner ISPT zijn uren overgedragen naar Blue-tec BV ivm cost statement activiteiten. Dit betrof 60 uur per jaar. Door Covid-19 is in WP-7 vooral veel online gedaan, daarom zijn er minder kosten gemaakt in WP 7.

Door partner Darling Ingredients zijn in totaal meer kosten gemaakt dan begroot. Dit omdat bij de testen op locatie in Loenen meer personele inzet vroeg dan initieel begroot. De materiële kosten vallen ietwat lager uit dan begroot omdat minder nodig was dan initieel bedacht.

## Kennis versrprijding en PR uit confidentiële eindrapport incl ISPT activiteiten, TU/e artikelen

De volgende vormen van disseminatie heeft plaats gevonden in het FOMM project.

|  |  |
| --- | --- |
| Website | Forward osomosis membrane and module development and process application (FOMM) |
| Poster | Novel polyethersulfone nanofiber composite membranes for forward osmosis applications |
| lezing | Electrospun nanofiber membranes for forward osmosis applications |
| Poster | Polysulfone nanofiber composite membranes for forward osmosis application |
| Lezing | Electrospun nanofiber membranes for forward osmosis applications |
| Lezing | Forward osmosis membranes by electrospinning |
| Artikel | Forward osmosis dewatering of industrial streams (co-author close to submission) |
| Beurs | Aquatech Amsterdam November 2019 |

# Colofoon

Dit project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Deze rapportage is te downloaden van de website van BLUE-tec bv ([www.blue-tec.nl](http://www.blue-tec.nl)).

Voor meer informatie kunt u zich wenden tot:

Annie Polman van BLUE-tec bv (anniepolman@blue-tec.nl).