

جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



دانشگاه اراک

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

**شبه سازی و ساخت غشای کامپوزیتی پلی آمید- نانو لوله**

**کربنی برای خالص سازی اتانول**

**پژوهشگر**

**محمد محمدی**

استاد راهنما

**دکتر صادق مرادی**

استاد مشاور

**دکتر اعظم مرجانی**

**دکتر محمود سلیمی**

تابستان ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

شبهه سازی و ساخت غشای کامپوزیتی پلی آمید- نانو لوله

کربنی برای خالص سازی اتانول

توسط

محمد محمدی

پایان نامه

ارائه شده به مدیریت تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی از فعالیت های تحصیلی لازم برای اخذ درجه

کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی شیمی

از

دانشگاه اراک

اراک-ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: .....

دکتر صادق مرادی (استاد راهنما) دانشگاه اراک.....

دکتر اعظم مرجانی (استاد مشاور) دانشگاه آزاد اسلامی اراک.....

دکتر محمود سلیمی (استاد مشاور) دانشگاه آزاد اسلامی اراک.....

دکتر عبدالرضا مقدسی (استاد مدعو داخلی) دانشگاه اراک.....

تابستان ۱۳۹۱

## تشکر و قدردانی

از همکاری صمیمانه جناب آقای **دکتر صادق مرادی** در تمام مراحل انجام این پژوهش، قدردانی می‌نمایم. هم‌چنین از راهنمایی‌های آموزنده و صمیمانه سرکار خانوم **دکتر اعظم مرجانی** و آقای **دکتر محمود سلیمی**، نهایت تشکر را دارم.

از زحمات بی‌دریغ پدر و مادرم در تمامی لحظات زندگی تشکر می‌نمایم.  
در پایان از تمامی همکاران و اساتید گروه مهندسی شیمی تشکر می‌شود.

## چکیده

اتانول یا الکل اتیلیک برخلاف دهه‌های گذشته که تنها به‌عنوان ماده مصرفی در تعدادی از صنایع کاربرد داشت، در حال حاضر به‌عنوان یکی از کالاهای مهم و راهبردی در بسیاری از کشورها شناخته می‌شود. امروزه اکثر فرآیندهای جداسازی در مقیاس صنعتی بر اساس روشهای مصرف انرژی از جمله تقطیر، تبخیر و تبلور می‌باشند. جداسازی‌های غشایی در بین تمامی فرآیندهای جداسازی موجود، به دلیل مصرف انرژی پایین، دستگاههایی با حجم کم، تنوع در ساخت مدول‌ها و... از امتیاز بیشتری برخوردارند. روش مورد استفاده در این پروژه برای خالص سازی اتانول، فرآیند تراوش تبخیری می‌باشد. این روش یکی از انواع فرایندهای جداسازی غشایی است که کاربردهای گسترده‌ای همچون آب زدایی و جداسازی مخلوطهای آلی دارد. مزیت عمده‌ی این روش استفاده‌ی آن برای سیستمهای دارای نقطه‌ی آزنوتروپ می‌باشد جایی که روش تقطیر سنتی قادر به جداسازی آنها نمی‌باشد.

در این پروژه ابتدا غشای پلی‌آمید ساخته شده است و سپس متغییرهای دمای عملیاتی، غلظتهای مختلف خوراک ورودی و دبی بررسی و پروفایل‌های غلظت و سرعت در بخشهای مختلف مدول ترسیم شدند. نتایج نشان داد که افزایش دما شار عبوری را افزایش و انتخاب پذیری را کاهش می‌دهد. هم‌چنین افزایش غلظت ورودی تاثیر مستقیم روی هر دو پارامتر مذکور داشت. نهایتاً به منظور بهبود نتایج جداسازی، از نانو لوله کربنی در ساخت ماتریس غشا استفاده شد. در صد‌های مختلفی از نانو لوله مورد تست قرار گرفت که بهترین نتایج در ۰/۵ درصد وزنی از پلیمر بدست آمد و میزان جداسازی را تا حد قابل قبولی افزایش داد. به منظور اطمینان از نتایج تجربی، شبیه سازی این فرآیند توسط نرم افزار کامسول انجام شد و تغییرات دبی و غلظت در نواحی مختلف از غشا و خوراک بررسی شدند. نتایج شبیه سازی برای مقادیر شار عبوری با نتایج تجربی در تطابق خوبی بودند.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه.....
۲	۱.۱. مقدمه.....
۳	۲.۱. پیشینه تحقیق.....
۷	۳.۱. فرآیند های غشایی.....
۸	۱.۳.۱. میکرو فیلتراسیون.....
۹	۲.۳.۱. اولترا فیلتراسیون.....
۱۰	۳.۳.۱. نانو فیلتراسیون.....
۱۱	۴.۳.۱. اسمز معکوس.....
۱۲	۵.۳.۱. جداسازی گاز.....
۱۳	۶.۳.۱. دیالیز.....
۱۴	۷.۳.۱. تراوش تبخیری.....
۱۴	۱.۷.۳.۱. ویژگی های عملیاتی.....
۱۵	۴.۱. تعریف غشا.....
۱۶	۱.۴.۱. ویژگی های غشا.....
۱۷	۵.۱. تقسیم بندی غشاء ها.....
۱۷	۱.۵.۱. تقسیم بندی بر اساس مکانیسم حاکم بر جداسازی.....
۱۷	۲.۵.۱. تقسیم بندی بر اساس جنس غشاء.....
۱۸	۱.۲.۵.۱. غشاهای پلیمری.....
۱۹	۲.۲.۵.۱. غشاهای سرامیکی.....
۲۰	۳.۲.۵.۱. غشاهای فلزی.....
۲۰	۴.۲.۵.۱. غشاهای مایع.....

## عنوان

## صفحه

۲۱	۳.۵.۱. تقسیم بندی بر اساس ساختمان و ساختار غشا
۲۳	۴.۵.۱. تقسیم بندی بر اساس شکل هندسی غشاء
۲۴	۶.۱. مدول ها
۲۴	۱.۶.۱. مدول مارپیچی
۲۵	۲.۶.۱. مدول لوله ای
۲۶	۳.۶.۱. مدول صفحه و قاب
۲۷	۴.۶.۱. مدول الیافی
۲۸	۵.۶.۱. مدول سرامیکی
۲۸	۷.۱. روشهای ساخت غشاهای پلیمری
۲۸	۱.۷.۱. روش کششی
۲۸	۲.۷.۱. روش پختن
۲۹	۳.۷.۱. روش حک اثر
۳۰	۴.۷.۱. روش تبدیل (جدایی) فاز
۳۰	۸.۱. غشاهای متراکم پلیمری
۳۰	۱.۸.۱. روشهای تهیه غشاهای پلیمری متراکم
۳۰	۱.۸.۱.۱. روش محلول
۳۱	۲.۱.۸.۱. روش مذاب
۳۱	۳.۱.۸.۱. روش پلیمریزاسیون
۳۲	۹.۱. فاکتورهای موثر بر عملکرد غشا
۳۲	۱.۹.۱. ترکیب و غلظت خوراک
۳۳	۲.۹.۱. فشار خوراک و جزء نفوذ کرده
۳۴	۳.۹.۱. دما
۳۵	۴.۹.۱. پلاریزاسیون غلظتی
۳۶	۱۰.۱. بررسی مدل انحلال - نفوذ در تراوش تبخیری

## عنوان

## صفحه

۱.۱۰.۱. اثبات مدل انحلال - نفوذ	۳۹
۱.۱.۱. نانو لوله ها	۴۲
۱.۱.۱.۱. نانولوله های کربنی	۴۲
۲.۱.۱.۱. خواص انواع نانو لوله ها	۴۳
۱.۲.۱.۱.۱. حالت رسانا و نیمه رسانایی آنها بر حسب شکل هندسی شان	۴۳
۲.۲.۱.۱.۱. سطح جداره صاف یا قدرت تفکیک بالا	۴۴
۳.۲.۱.۱.۱. حساس به تغییرات کوچک نیروی اعمال شده	۴۴
۴.۲.۱.۱.۱. گسیل و جذب نور	۴۴
۵.۲.۱.۱.۱. قابلیت ذخیره سازی	۴۵
۶.۲.۱.۱.۱. چگالی سطحی بسیار بالا	۴۵
۷.۲.۱.۱.۱. داشتن خاصیت ابر رسانایی	۴۵
۸.۲.۱.۱.۱. استحکام و مقاومت کششی بالا	۴۵
<b>فصل دوم: شبیه سازی</b>	
۱.۲. مقدمه	۴۷
۲.۲. مدل سازی	۴۸
۳.۲. معادلات حاکم	۵۰
۱.۳.۲. معادلات مربوط به خوراک	۵۱
۲.۳.۲. معادلات مربوط به غشا	۵۲
<b>فصل سوم: مواد و آزمونها</b>	
۱.۳. مقدمه	۵۳
۲.۳. مواد اولیه مورد استفاده	۵۴
۱.۲.۳. پلیمر	۵۴

## عنوان

## صفحه

۵۵	..... ۲.۲.۳. حلال پلیمر
۵۶	..... ۳.۲.۳. خوراک
۵۷	..... ۴.۲.۳. نانو لوله کربنی
۵۸	..... ۳.۳. تجهیزات آزمایشگاهی
۵۸	..... ۱.۳.۳. ویژگی های خوراک و دستگاه
۵۹	..... ۲.۳.۳. روش ساخت فیلم
۵۹	..... ۳.۳.۳. دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی
۶۱	..... ۴.۳.۳. دستگاه گاز کروماتوگرافی
۶۴	..... <b>فصل چهارم: نتایج</b>
۶۵	..... ۱.۴. مقدمه
۶۵	..... ۲.۴. پارامترهای موثر در آزمایشات تراوش تبخیری
۶۶	..... ۳.۴. مکانیسم و تعاریف موجود در تراوش تبخیری
۶۷	..... ۴.۴. نتایج حاصل از آزمایشات تراوش تبخیری
۶۷	..... ۱.۴.۴. مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه سازی برای مقادیر فلاکس اتانول خروجی
۶۹	..... ۲.۴.۴. اثر غلظت ورودی اتانول روی غلظت خروجی، انتخاب پذیری و شاخص جداسازی
۷۰	..... ۳.۴.۴. اثر افزایش دما بر شار اتانول خروجی و ضریب جداسازی
۷۲	..... ۴.۴.۴. اثر افزودن نانو لوله کربنی در ساخت غشا بر میزان جداسازی
۷۳	..... ۵.۴.۴. اثر زمان انجام فرآیند بر فلاکس
۷۳	..... ۶.۴.۴. اثر درصد وزنی پلیمر بر میزان جداسازی
۷۴	..... ۵.۴. عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی
۷۶	..... ۶.۴. کروماتوگرامهای دستگاه کروماتوگرافی گازی برای غلظتهای متفاوت اتانول در خوراک
۸۱	..... ۷.۴. نتایج شبیه سازی
۸۱	..... ۱.۷.۴. بررسی تغییر میدان سرعت در سمت خوراک و توزیع غلظت اتانول در دو بخش خوراک و غشا



## عنوان

## صفحه

۲.۷.۴. بررسی اثر تغییرات دبی روی پروفایل‌های سرعت و غلظت ..... ۸۳

۳.۷.۴. بررسی تغییرات غلظت شعاعی و محوری در دو سمت خوراک و غشا ..... ۸۴

۴.۷.۴. بررسی تغییرات شار کلی در مدول ..... ۸۸

۸۹..... **فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات**

۱.۵. نتیجه گیری ..... ۹۰

۱.۱.۵. میزان درصد وزنی پلیمر در ساخت غشا ..... ۹۰

۲.۱.۵. اثر غلظت اولیه خوراک بر غلظت نهایی ..... ۹۰

۳.۱.۵. تاثیر دما بر شار عبوری و ضریب جداسازی ..... ۹۰

۴.۱.۵. اثر افزایش دبی در عبور دهی ..... ۹۰

۵.۱.۵. افزودن نانو لوله کربنی به ماتریس غشا ..... ۹۱

۲.۵. پیشنهادات ..... ۹۱

۹۲..... **مراجع**

## Abstract

## Title of thesis

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۸	جدول (۱-۱) دسته بندی غشایی بر اساس نیروی محرکه
۶۳	جدول (۱-۳) برنامه ریزی دمایی، دمای محل تزریق، دمای دتکتور
۵۵	جدول (۲-۳) مشخصات پلیمر
۵۶	جدول (۳-۳) مشخصات حلال
۵۶	جدول (۳-۴) مشخصات اتانول
۵۷	جدول (۳-۵) مشخصات نانو لوله کربنی
۶۸	جدول (۴-۱) مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه سازی برای مقادیر فلاکس اتانول خروجی
۶۹	جدول (۴-۲) مقادیر غلظت خروجی، انتخاب پذیری و شاخص جداسازی در غلظتهای متفاوت ورودی
۷۱	جدول (۴-۳) مقایسه بین داده های شبیه سازی با نتایج تجربی برای مقادیر فلاکس اتانول خروجی
	جدول (۴-۴) مقایسه ی بین داده های تجربی برای مقادیر غلظت خروجی اتانول در دو حالت (الف) بدون نانولوله کربنی و (ب) همراه با نانو لوله کربنی
۷۲	

## فهرست شکلها

صفحه	عنوان
۹	شکل (۱-۱) فرآیند جداسازی میکرو فیلتراسیون
۱۰	شکل (۲-۱) فرآیند جداسازی اولترا فیلتراسیون
۱۱	شکل (۳-۱) فرآیند جداسازی نانو فیلتراسیون
۱۲	شکل (۴-۱) فرآیند جداسازی اسمز معکوس
۱۳	شکل (۵-۱) فرآیند جداسازی گازی
۱۵	شکل (۶-۱) عملیات سلول غشایی در فرآیند تراوش تبخیری
۱۸	شکل (۷-۱) غشای پلیمری
۱۹	شکل (۸-۱) غشای سرامیکی
۲۰	شکل (۹-۱) غشای فلزی
۲۳	شکل (۱۰-۱) ساختار غشاهای متقارن و نامتقارن
۲۵	شکل (۱۱-۱) نمایی از یک مدول مارپیچی
۲۶	شکل (۱۲-۱) مدول لوله ای
۲۷	شکل (۱۳-۱) مدول الیافی
۳۳	شکل (۱۴-۱) اثر غلظت خوراک بر جداسازی تراوش تبخیری آلی-آلی برای مخلوط بنزن/سیکلو هگزان
۳۴	شکل (۱۵-۱) اثر فشار بر فرآیند تراوش تبخیری (در مخلوط اتانول / بنزن)
۳۵	شکل (۱۶-۱) روند کلی شار و انتخاب پذیری مخلوط بنزن/سیکلو هگزان با تغییر دما
	شکل (۱۷-۱) اندازه گیری روزنهام و کاتن از گرادپانهای غلظت آب در یک غشای سلولز استات محدود شده تحت فشارهای عملیاتی ۶۸ و ۱۳۶ اتمسفر
۴۰	
۴۱	شکل (۱۸-۱) شار نرمال هگزان درون یک غشای لاستیکی به صورت تابعی از اختلاف غلظت هگزان در غشا
۴۳	شکل (۱۹-۱) نانو لوله کربنی
۴۹	شکل (۱-۲) مدل سلول غشایی

- شکل (۳-۱) دستگاه تراوش تبخیری ..... ۵۸
- شکل (۳-۲) شماتیک میکروسکوپ الکترونی روبشی ..... ۶۰
- شکل (۳-۳) (الف) میکروسکوپ الکترونی روبشی، (ب) دستگاه روکش کننده طلا ..... ۶۱
- شکل (۴-۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح غشای بدون نانو لوله کربنی ..... ۷۵
- شکل (۴-۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح غشا همراه با ۰/۵ درصد نانو لوله کربنی ..... ۷۵
- شکل (۴-۳) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح غشا همراه با ۲ درصد نانو لوله کربنی ..... ۷۵
- شکل (۴-۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح غشا همراه با ۴ درصد نانو لوله کربنی ..... ۷۶
- شکل (۴-۵) (الف) نمایش میدان سرعت در سمت خوراک، (ب) توزیع غلظت اتانول در خوراک ( $C/C_0$ ) و غشا ( $C_m/C_0$ ) ..... ۸۲
- شکل (۴-۶) توزیع شار کلی در مدول ..... ۸۸

## فهرست نمودارها

عنوان	صفحه
نمودار (۴-۱) مقایسه ی بین نتایج تجربی با شبیه سازی برای مقادیر شار عبوری .....	۶۸
نمودار (۴-۲) تاثیر میزان غلظت اتانول وروردی روی شار عبوری و ضریب جداسازی در دمای ۲۲ °C .....	۷۰
نمودار (۴-۳) تاثیر دمای محلول خوراک روی عملکرد شار عبوری و ضریب جداسازی برای غلظت ۲۰ درصد وزنی خوراک .....	۷۱
نمودار (۴-۴) کروماتوگرام حاصل از GC برای غلظت اولیه ۲۰ درصد وزنی اتانول در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد .....	۷۷
نمودار (۴-۵) کروماتوگرام حاصل از GC برای غلظت اولیه ۲۰ درصد وزنی اتانول در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد .....	۷۷
نمودار (۴-۶) کروماتوگرام حاصل از GC برای غلظت اولیه ۲۰ درصد وزنی اتانول در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد .....	۷۷
نمودار (۴-۷) کروماتوگرام حاصل از GC برای غلظت اولیه ۲۰ درصد وزنی اتانول در دمای ۶۵ درجه سانتیگراد .....	۷۸
نمودار (۴-۸) کروماتوگرام حاصل از GC برای غلظت اولیه ۴۰ درصد وزنی اتانول در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد .....	۷۸
نمودار (۴-۹) کروماتوگرام حاصل از GC برای غلظت اولیه ۵۰ درصد وزنی اتانول در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد .....	۷۸
نمودار (۴-۱۰) کروماتوگرام حاصل از GC برای غلظت اولیه ۷۰ درصد وزنی اتانول در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد توسط	۷۹
نمودار (۴-۱۱) کروماتوگرام حاصل از GC برای غلظت اولیه ۸۰ درصد وزنی اتانول در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد .....	۷۹
نمودار (۴-۱۲) کروماتوگرام حاصل از GC برای غلظت اولیه ۹۰ درصد وزنی اتانول در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد .....	۷۹
نمودار (۴-۱۳) کروماتوگرام حاصل از GC برای غلظت اولیه ۲۰ درصد وزنی اتانول در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد توسط	۸۰
غشای همراه با ۰/۵ درصد نانو لوله کربنی .....	۸۰
نمودار (۴-۱۴) کروماتوگرام حاصل از GC برای غلظت اولیه ۳۰ درصد وزنی اتانول در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد توسط	۸۰
غشای همراه با ۰/۵ درصد نانو لوله کربنی .....	۸۰
نمودار (۴-۱۵) کروماتوگرام حاصل از GC برای غلظت اولیه ۴۰ درصد وزنی اتانول در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد توسط	۸۱
غشای همراه با ۰/۵ درصد نانو لوله کربنی .....	۸۱
نمودار (۴-۱۶) توزیع غلظت محوری در سمت خوراک .....	۸۳
نمودار (۴-۱۷) توزیع غلظت محوری در سمت غشا .....	۸۳
نمودار (۴-۱۸) پروفایل سرعت محوری در سمت خوراک .....	۸۴

## عنوان

## صفحه

- نمودار (۴-۱۹) تغییرات غلظت شعاعی در سمت خوراک در  $y = L/3$  ..... ۸۵
- نمودار (۴-۲۰) تغییرات غلظت شعاعی در سمت خوراک در  $y = L/2$  ..... ۸۵
- نمودار (۴-۲۱) تغییرات غلظت شعاعی در سمت خوراک در  $y=L$  ..... ۸۶
- نمودار (۴-۲۲) تغییرات غلظت محوری در سمت غشا ..... ۸۷
- نمودار (۴-۲۳) تغییرات غلظت شعاعی در سمت غشا ..... ۸۷

# فصل اول

مقدمه

## ۱.۱. مقدمه

امروزه اکثر فرآیندهای جداسازی در مقیاس صنعتی بر اساس روشهای مصرف انرژی از جمله تقطیر، تبخیر و تبلور می باشند. جداسازی های غشایی در بین تمامی فرآیندهای جداسازی موجود، از امتیاز بیشتری برخوردار است. تکنولوژی های جداسازی غشایی رایج دارای ویژگی هایی از جمله ذخیره ی انرژی، ساخت مدول هایی با هزینه کمتر، انتخاب گری بالا در مواد جداسازنده و فرآوری محصولات حساس به دما می باشند. نیروی محرکه لازم در فرایندهای غشایی می تواند به صورت اختلاف غلظت، فشار، دما و پتانسیل الکتریکی باشد. ساده ترین نوع غشاها بر اساس اختلاف اندازه ذرات عمل می کنند که از این نظر مشابه فیلترها هستند، ولی غشاها از لحاظ اندازه منافذ و توزیع اندازه آنها و نیز نحوه جریان با فیلترها تفاوت دارند. کارایی غشاها با دو پارامتر تعیین می گردد که شامل دبی عبور کرده از غشا و گزینش پذیری غشاها است [۱].

اتانول یا الکل اتیلیک برخلاف دهه های گذشته که تنها به عنوان ماده مصرفی در تعدادی از صنایع کاربرد داشت، در حال حاضر به عنوان یکی از کالاهای مهم و راهبردی در بسیاری از کشورها شناخته می شود و در عین حال حجم تولید این ماده روز به روز در حال افزایش است. بزرگترین کاربرد اتانول به صورت خالص به عنوان سوختی پاک در موتور خودروها است. هم چنین اتانول را می توان در پیل های سوختی مستقیم برای تولید برق همراه با محصولات جانبی آب و دی اکسید کربن بکار برد و نیز این ماده می تواند به عنوان سوخت موشک برای افزایش نیروی پیشرانه بکار رود. اتانول را در مراکز پزشکی برای ضد عفونی لوازم پزشکی، زخم و مواد ضد عفونی کننده دست استفاده می کنند. اتانول به دو طریق سنتزی و تخمیری تولید می شود. در روش تولید سنتزی، این ماده از مواد نفتی استحصال می گردد و در روش تخمیر از مواد غذایی و گیاهان حاوی قند استفاده می شود. بیشترین اتانول تولیدی در جهان (حدود ۹۳ درصد) از روش تخمیر و فقط حدود ۷ درصد از روش مصنوعی تولید می گردد [۲].



نیاز به تکنولوژی جداسازی غشایی با توجه به احتیاجات تنگاتنگ محیطی روبه افزایش است. شش فرآیند مهم غشایی شامل ۱- میکروفیلتراسیون<sup>۱</sup>، ۲- اولترافیلتراسیون<sup>۲</sup>، ۳- اسمز معکوس<sup>۳</sup>، ۴- الکترودیالیز<sup>۴</sup>، ۵- جداسازی گاز<sup>۵</sup> و ۶- تراوش تبخیری<sup>۶</sup> در زمینه هایی چون خالص سازی آب، فرآیندهای شیمیایی و غذایی، پزشکی و جداسازی های زیستی مورد استفاده قرار می گیرند [۳].

## ۲.۱. پیشینه تحقیق

در سال ۱۹۹۴ دی . بیومل<sup>۷</sup> و همکارانش مدل "جابجایی- نفوذ" را برای محاسبه ی گرادیان فشار در فاز بخار تا ناحیه پایین دست غشا بکار بردند. آنها عقیده داشتند که از تاثیر فشار پایین دست در جداسازی اجزای آلی در غشاهای آلی دوست، خصوصا در دماهای پایین نمی توان صرف نظر کرد. آنها معادله ی جابجایی نفوذ را با یک رابطه برای انتقال جرم درون غشا همراه با نیرو محرکه ای که دلالت بر اختلاف فوگاسیته دارد، ترکیب کردند. فشار جزئی و شار عبوری از غشا ابتدا توسط یک جزء خالص و سپس از میان مخلوط دو تایی آب/تانول توسط غشای پلی دی متیل سیکلوکسان روی یک مقیاس نیمه صنعتی توانست مدل را به خوبی پیش بینی نماید [۴]

در سال ۱۹۹۷ رابرت هوانگ<sup>۸</sup> و همکارش به بررسی سه نوع متفاوت از غشاهای ترکیبی بر پایه ی چیتوسان و پلی آکرلیک اسید برای جداسازی مخلوط آب/تانول به روش تراوش تبخیری پرداختند. آنها پی بردند که تمام غشاهای ساخته شده به شدت آب گزین هستند. وابستگی دمایی روی نفوذگزینی

---

<sup>1</sup> Micro filtration

<sup>2</sup> Ultra filtration

<sup>3</sup> Reverse osmosis

<sup>4</sup> Electrodialysis

<sup>5</sup> Gas separation

<sup>6</sup> Pervaporation

<sup>7</sup> D. Beaumelle

<sup>8</sup> Robert Y.M. Huang

برای محلولهای خوراکی با درصد بالا از آب (بیشتر از ۳۰٪) غیر عادی بود به طوری که هر دو پارامتر شار و ضریب جداسازی با افزایش دما افزایش یافتند. این پدیده از جنبه ی انرژی فعال سازی توصیف شد، به این ترتیب که سهم جذب سطحی روی انرژی فعال سازی نفوذ، زمانی که برهم کنش های قوی در سیستم غشایی تراوش تبخیری رخ می دهد نباید نادیده گرفته شود [۵].

در سال ۱۹۹۹ رارن لی کویر<sup>۱</sup> و همکارانش دو نوع از غشاهای پلی آمید آروماتیکی را برای جداسازی آب و الکل توسط روش تراوش تبخیری بکار بردند و مشاهده کردند که آرمید های (آروماتیک آمیدها) نوع H نسبت به نوع F ضریب جداسازی بالاتری دارند [۶].

مین-یو تنگ<sup>۲</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۰ به مقایسه ی دو فرایند تراوش تبخیری و تراوش بخار در جداسازی مخلوط الکلها پرداختند. آنها پی بردند که حلالیت الکلها در غشاهای آروماتیکی بالاتر از آب می باشد ولی میزان نفوذ آب بیشتر از الکل می باشد. هم چنین رابطه ای بین ساختار پلیمر و عملکرد فرآیند تراوش تبخیری دست یافتند [۷].

در سال ۲۰۰۶ شو سینگ هوانگ<sup>۳</sup> و همکارانش نشان دادند که غشاهای ساخته شده از پلی آمید با وجود داشتن فاکتور انتخاب پذیری بالا برای مخلوطهای آب و الکل، به علت داشتن حجم آزاد کمتر، شار نفوذی پایینی دارند. آنها برای افزایش شار عبوری از غشاهای پلی آمید بدون تغییر در فاکتور جداسازی، دست به تغییر مورفولوژی غشا از حالت متقارن به یک حالت غیر متقارن و یا از نوع ترکیبی زدند. آنها گزارش کردند که توسعه غشاهای ترکیبی پلی آمید یکی از فاکتورهای کلیدی موفقیت آمیز در بسیاری از جهات است [۸].

---

<sup>1</sup> Kueir-Ram Lee

<sup>2</sup> Min-Yu Teng

<sup>3</sup> Shu-Hsien Huang

در سال ۲۰۰۹ یان وانگا<sup>۱</sup> و همکارانش به بررسی جداسازی ایزومر بوتانول از طریق فرآیند تراوش تبخیری پرداختند. آنها به بررسی و ساخت غشای ماتریس آمیخته متشکل از پلی آمید-ایمید و سه نوع سیکلو دکسترین<sup>۲</sup> پرداختند. آنها فهمیدند که غشای ماتریس مرکب ساخته شده با سیکلو دکسترین در مقایسه با غشای متراکم خالص پلی آمید-ایمید عملکرد جداسازی بهتری را از خود نشان می دهد.[۹].

در سال ۲۰۱۱ میلادی ری<sup>۳</sup> و همکارانش انتخاب نظام گونه ی اتصالات و پرکننده ها به وسیله فرآیند تراوش تبخیری غشاء، برای آبدایی کردن از ترکیب مخلوط آب-الکل باغشاء پلی وینیل الکل را بررسی کردند. غشا پلی وینیل الکل ، با غلظت ۲، ۴ و ۶ درصد جرمی و با استفاده از ۴ نوع متفاوت از اتصال دهنده های عرضی مانند گلو تار آلدهید، اگزالیک اسید، دی میتلول اوره و تترا اتیل ارتوسیلیکات، برای تولید کردن ۴ نوع متفاوت غشاهای پلی وینیل الکلی با استفاده از اتصالات عرضی توسط مواد بالا به کار رفت [۱۰].

در سال ۲۰۱۲ لیو لی<sup>۴</sup> و همکارانش به تولید و اصلاح پلی آمید جدیدی توسط سه روش اتصالات عرضی ۱- گرمایی، ۲- دی آمینو و ۳- دی اول پرداختند. آنها اصلاحات اتصالات عرضی روی غشاهای پلی آمید را با یکدیگر مقایسه و عملکرد غشا را برای آب زدایی از اتانول بررسی کردند. آنها گزارش کردند که اتصال عرضی دی اول، شار عبوری بالا اما ضریب جداسازی پایینی دارد [۱۱].

در سال ۲۰۱۲ مونا ایروانی نیا<sup>۵</sup> و همکارانش جداسازی مخلوط تولوئن/ نرمال هپتان را از طریق تراوش تبخیری توسط غشاهای ترکیبی بررسی کردند. تاثیر شرایط عملیاتی نظیر دمای خوراک،

---

<sup>1</sup> Yan Wanga

<sup>2</sup> Cyclodextrine (CD)

<sup>3</sup> S.K. Ray

<sup>4</sup> Ngoc Lieu Le

<sup>5</sup> Mona Iravaninia

ترکیب خوراک و فشار پایین دست روی عملکرد غشا بررسی شد. نتایج آزمایشهای آنها در ترکیب درصدهای متفاوت خوراک (۴۰٪-۱۰٪ وزنی)، دماهای عملیاتی (۸۵-۲۵ درجه سلسیوس)، و فشارهای پایین دست (۲-۳۲ میلی بار)، بدست آمد. آنها پی بردند که گزینش پذیری غشا برای تولوئن بزرگتر از نرمال هپتان می باشد. طبق نتایج آنها افزایش غلظت تولوئن در خوراک و افزایش دمای عملیاتی، میزان تورم غشا را بهبود و میزان جنبش زنجیره ی پلیمری را افزایش می دهد. با افزایش در غلظت و دمای خوراک، میزان شار عبوری بیشتر و نفوذ گزینی کم شد. طبق گزارش آنها کاهش فشار هم نتیجه ای مشابه افزایش دما به همراه داشت [۱۲].

هم اکنون ۲۲ واحد صنعتی برای آب زدایی از اتانول (اولین کاربرد صنعتی تراوش تبخیری)، ۱۶ واحد برای آب زدایی از ایزو پروپانول و ۱۲ واحد برای تصفیه حلالهای آلی در صنعت در حال کار است. آب زدایی از سوخته‌های خطرناک نظیر هیدرازین، ان و ان دی متیل هیدرازین نامتقارن<sup>۱</sup> و منومتیل هیدرازین<sup>۲</sup> با استفاده از تراوش تبخیری به طور گسترده ای توسط سایر محققین مورد مطالعه قرار گرفته است. اخیرا غشاهای آلی دوست<sup>۳</sup> نسبت به غشاهای آبدوست<sup>۴</sup> توسعه زیادی پیدا کرده اند. پتانسیل ظاهری بسیار بالای این تکنولوژی خصوصا برای استخراج ذرات آلی، بیانگر یک حلالیت بسیار پایین در آب است. در سالهای اخیر استفاده از روش تراوش تبخیری برای جداسازی مخلوطهای آلی، نظر بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. این یکی از دلایلی است که چرا امروزه صنعت پتروشیمی، روش تراوش تبخیری را به عنوان یک روش برای حذف آروماتیکها از گازوئیل که یکی از مهمترین عواملی است که به سلامتی بشر مربوط می شود، مد نظر قرار می دهد [۱۳].

<sup>1</sup> Unsymmetrical dimethylhydrazine(UDMH)

<sup>2</sup> Monomethyl hydrazine (MMH)

<sup>3</sup> Organophilic

<sup>4</sup> Hydrophilic