

# تئوری جدید برای کاهش هزینه‌های انرژی صنایع گازی توسط فناوری غشایی

موسی توانا<sup>۱</sup>، نظام الدین اشرفی زاده<sup>۲</sup>، عیسی توانا<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۲/۱۰/۶

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۳/۴/۲۷

## چکیده:

امروزه در صنایع به دنبال راه‌کارهای جدید بهینه‌سازی مصرف انرژی هستند. روزانه صنایع مقدار زیادی بخار آب حاوی انرژی گرمایی را از طریق دودکش به اتمسفر تخلیه می‌کنند که می‌تواند منبع بالقوه‌ای برای تامین انرژی و آب لازم نیروگاه‌ها باشد. در این مقاله مطالعه‌ای عددی به منظور بررسی انتقال جرم و گرما از طریق چگالش بخارهای زائد توسط مبدل غشایی که به منظور بازیابی گرما و آب از گاز دودکش استفاده می‌شود، صورت گرفته است. غشاهای متخلخل، بخار آب زائد هدر رفته از صنایع را از طریق سازوکار چگالش موئینگی جذب و بازیابی می‌نمایند و از گرمای محسوس و نهان هدر رفته به طور مجدد استفاده می‌کنند. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده از مراجع مقایسه شدند و مقادیر محاسبه شده مقدار انحراف متوسط ۶ درصد را با مقادیر آزمایشگاهی نشان داد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد مبدل چگالنده غشایی دارای ضرایب انتقال جرم و حرارت به ترتیب ۷۰ و ۵۵ درصد بزرگتر از مبدل حرارتی می‌باشد.

## کلمات کلیدی:

آب، شبیه‌سازی، بازیافت، انرژی گرمایی، غشا

mousatavana@chemeng.iust.ac.ir  
ashrafi@iust.ac.ir  
tavana.esia@yahoo.com

(۱) کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران  
(۲) دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران (نویسنده مسئول)  
(۳) کارشناسی مهندسی پلیمر، دانشگاه آزاد واحد بوشهر

## مقدمه

امروزه بالا بودن قیمت انرژی و مصرف بی‌رویه به چالشی برای صنایع مختلف بدل شده است. به همین دلیل، در صنعت به دنبال یافتن فناوری‌های جدید برای بازیافت انرژی حرارتی و آب می‌باشند. در فرایندهای صنعتی، ورود مجدد به چرخه و استفاده دوباره از جریان‌های موجود در فرایند، به ویژه آب، برای حداقل سازی نیاز به آب پاک و تازه ضروری است [۳]. از طرفی دیگر، تخلیه بخار به اتمسفر نه تنها هدر دادن انرژی است بلکه به طور هم زمان حامل آسیب‌های زیست محیطی است، چرا که بخار آب از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای است که تغییرات آب و هوایی را تسریع می‌کند [۹].

در حال حاضر، فناوری تجاری‌سازی شده‌ای برای بازیابی آب از بخار آب اتلافی فرایندهای صنعتی وجود ندارد. به طور کلی، به شکل نظری این احتمال وجود دارد که با مبدل‌های گرمایی به روش چگالش از گاز، آب گرفت. مثالی از آن را می‌توان در پروژه "بازیابی آب از بویلر گازسوز" یافت که توسط وزارت انرژی امریکا طبق مجوز شماره 42727.2.4-DE-FC26-06NT انجام گرفته است. هدف این پروژه، توسعه مبدل‌های حرارتی چگالش برای بازیابی آب از گازهای خروجی از نیروگاه‌های زغال‌سنگی بود [۳].

فناوری غشا این توانایی را دارد که جداسازی بخار آب را از جریان‌های گازی انجام داده و آب پاکی با خلوص بالا تولید نمایند. این مزیت‌ها غشا را به یک گزینه جالب و امیدبخش تبدیل می‌کند تا بخار آب را از جریان‌های گازی حاصل از نیروگاه‌ها جدا کند [۱۰]. تاکنون هم غشاهای متراکم و هم غشاهای آب دوست متخلخل بدین منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۴]. در مورد غشاهای متراکم، گاز از طریق نفوذ رطوبت زدایی و خشک می‌شود. مشکل اساسی این غشاها آن است که در فشار بالا کار می‌کنند، زیرا برای برقراری جریان نفوذی بخار آب از خلال غشا، وجود اختلاف فشار ضروری است. این مسئله به نوبه خود به معنای تراکم، مصرف بالای انرژی و هزینه بالاست. سیستم‌های رطوبت زدایی که بر پایه غشاهای آب دوست هستند بر مبنای انتخاب پذیری رطوبت کار می‌کنند. به عبارتی دیگر، غشا مانعی بین فاز گاز مرطوب و فاز مایع سردکننده (معمولاً آب) است. دمای ماده سردکننده در کنار اختلاف فشار دو سوی غشا، شار آب از گاز مرطوب به بخش ماده سردکننده را موجب می‌شود [۱۶]. سرعت بالای نفوذ بخار آب از میان یک غشای یونی غیر متخلخل به عنوان روشی برای بازیافت بخار با خلوص بالا در درجه حرارت‌های نزدیک به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد یا بالاتر از آن گزارش شده است [۱۵]. غشاهای کامپوزیتی نانوذرات PVA/سیلیکا برای بازیافت بخار مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و شار بخار آب  $70-150 \text{ Kg/m}^2\text{h}$  در اختلاف فشار ۶ bar به دست آمده است [۹]. دستگاه جذب بخاری که از غشاء ژئولیتی استفاده می‌کرد، در کارخانه تولید قند به کار گرفته شد و شارهای بسیار بالای  $11/9$ ،  $14/9$ ،  $17/6$  و  $22/4 \text{ Kg/m}^2\text{h}$  به ترتیب در  $100$ ،  $110$ ،  $120$  و  $130$  °C گزارش شد [۵]. ژانگ<sup>۱</sup> و همکارانش نشان دادند که نسبت نفوذپذیری آب به هوا برای

1) Zhang et al.

غشا آب دوست، محدوده‌ای بین ۴۶۰ تا ۳۰۰۰۰ دارد. به بیان دیگر، به غیر از بخار آب، دیگر گازها به ندرت می‌توانند از چنین غشاهایی بگذرند [۱۹]. مزیت استفاده از این نوع غشا برای جداسازی بخار آب از مخلوط بخار/گاز، در نیروی بین مولکولی قوی آن‌ها با مولکول‌های آب است. این نیروی بین مولکولی قوی منجر به اختلاف نفوذ زیاد بین بخار آب و دیگر ترکیب‌های موجود در جریان‌ات گازی می‌شود. بنابر این، در سال‌های اخیر توجه به این نوع روش‌ها بیش از پیش شده است [۱۱].

مطالعات آزمایشگاهی نشان داد که یک غشا نانوسرامیکی متخلخل که میانگین اندازه منافذ آن ۶ نانومتر باشد، هنگامی که در حالت انتقال نفوذ ناسن کار کند، طبق انتظار، شار انتقال بخار آب اندک و قابلیت جداسازی ضعیفی دارد. اما زمانی که جریان گاز از سمت تراویده، توسط انتقال دهنده گرما، به اندازه کافی سرد شود و رطوبت نسبی گازهای خروجی افزایش یابد، حالت انتقال مویبندی در غشا متخلخل به وجود می‌آید. سپس شار انتقال بخار آب تا بیش از ۵ برابر میزان اندازه‌گیری شده برای حالت نفوذ ناسن، افزایش می‌یابد و نسبت تفکیک تا بیش از ۱۰۰ برابر بهبود پیدا می‌کند. در نتیجه مرحله چگالش مویبندی غشا، یک نقطه بحرانی برای تفکیک بخار در غشا متخلخل است که در آن از حالت کارایی پائین به حالت کارایی بالا تبدیل می‌شود [۲].

این فناوری مفهوم نسبتاً جدیدی در بازیابی گرمای اتلافی دارد و در حال حاضر تنها توسط شرکت گاز کالیفرنیا جنوبی تولید می‌شود که حق انحصاری آن را به دست آورده است [۲۰]. نبود رقابت و جنبه‌های جدید فناوری منجر به افزایش هزینه‌های اجرائی می‌گردد که از معایب این فناوری به شمار می‌رود. تاکنون جداسازی بخار آب توسط فناوری چگالنده غشایی در واحد بازیافت بخار آب از بویلرها مورد استفاده قرار گرفته است و تحلیل‌های انجام شده توسط لیو و همکاران<sup>۱</sup> ادعا می‌کند که طبق تحلیل‌های اقتصادی، دوره بازگشت سرمایه کمتر از یک سال می‌باشد. این محصول در سال ۲۰۱۱ برای بویلرهای محدوده ۲۰۰ تا ۴۰۰ اسب بخار به فروش رسیده و در سال ۲۰۱۳ برای بویلرهای بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ اسب طراحی شده است [۲۰].

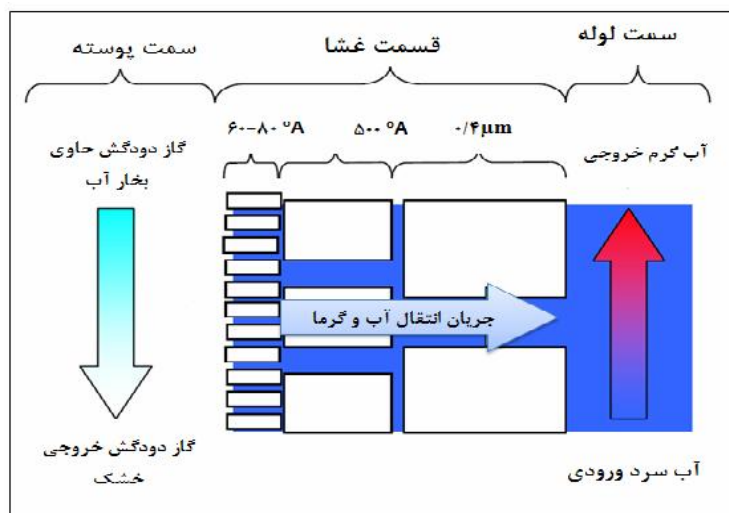
دینامیک سیالات محاسباتی اخیراً برای شبیه‌سازی فرایندهای غشایی مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها تاکنون برای شبیه‌سازی فرایندهای غشایی شامل میکرو فیلتراسیون، اوالترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و جداسازی گاز به کار گرفته شده است [۱] و [۸] و [۱۷]. از طرفی، ارائه مدلی که بتواند مسایل انتقال جرم و انتقال حرارت فرلیند چگالش بخار آب در غشا را پیش بینی کند، امری ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله، به مدل‌سازی انتقال جرم و گرما از طریق چگالش در دسته لوله غشای سرامیکی که به منظور بازیابی گرما و آب از گاز دودکش حاصل از احتراق استفاده می‌شود، پرداخته شده است. جدار لوله از ماده خاص متخلخلی طراحی گردیده که قادر به استخراج مایع چگالیده شده از گاز دودکش

1) Liu et al.

می‌باشد. همچنین به منظور اعتبارسنجی، نتایج با داده های تجربی استخراج شده از یک پروژه تحقیقاتی [۲] مقایسه شده است.

## تئوری

جداسازی بخار آب در مبدل فولادی به علت تاثیر دمای سیال سرد می‌باشد که باعث ایجاد چگالش روی سطح مبدل می‌شود. در نتیجه این فرایند، آب میعان یافته نسبتاً کثیف و خورنده تولید می‌شود [۱۳]. اما چگالش در مبدل غشایی زمانی اتفاق می‌افتد که یکی از ترکیب‌های گاز قابل چگالش بوده و حفره‌ها کوچک هستند. در این حالت، چگالش مویینگی می‌تواند رخ دهد. در این حالت، میعان‌های ایجاد شده می‌توانند نفوذ فاز گازی از طریق حفره‌ها را متوقف نموده و تنها به فاز میعان یافته اجازه عبور بدهند [۱۹]. همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، چگالنده غشایی از طریق استخراج گزینشی بخار آب کم فشار از گازهای خروجی به درون مجاری موئینه ریز واقع در غشاهای نانوسرامیکی متخلخل کار می‌کند و در داخل منافذ بخار آب توسط فرایند چگالش مویینگی و همچنین به دلیل اثر خنک‌کنندگی آب خنک موجود در سمت پوسته چگالنده، به شکل مایع در می‌آید. از آنجا که آب به وسیله انتقال از درون غشا بازیابی می‌شود، این آب خالص بوده و فاقد بسیاری از ناخالصی‌هایی است که در آب میعان یافته در مبدل‌های حرارتی سنتی یافت می‌شود.



شکل (۱) نمایی از فرایند چگالنده غشایی در مقیاس میکرو

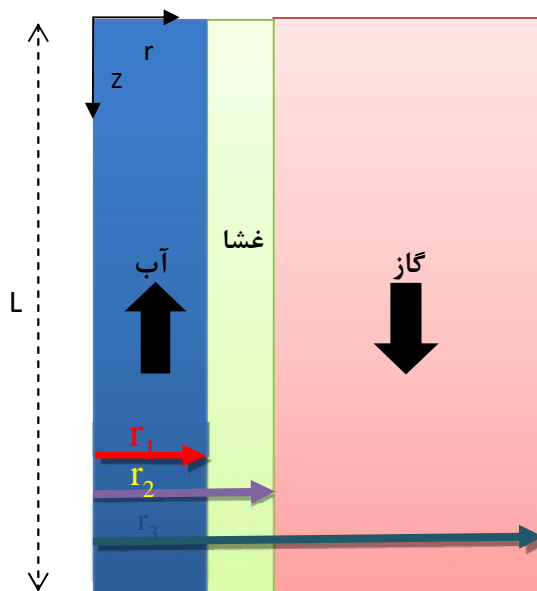
تساوی کلون پیش بینی می‌کند چنانچه فشار جزئی آن جزء ترکیب پایین تر از فشار بخارش باشد، در حفره‌های ریز چگالش می‌تواند رخ دهد. در بسیاری موارد، چگالش مویینگی در ۵۰ تا ۸۰ درصد فشار بخار اشباع آغاز می‌شود در نتیجه، حفره‌ها می‌تواند به طور کامل از آب میعان یافته پر شود [۱۲]. شار دیگر اجزای ترکیب در گاز خروجی از خلال غشا بسیار

کم بوده و به میزان انحلال پذیری آنها در آب و میزان جنبش و حرکت مولکول‌هایی که توسط مولکول‌های آب محاصره شده‌اند (حلال پوشیده) محدود می‌شود. بنابراین، در مورد بخار آب می‌توان به نسبت تفکیک بسیار بالایی دست یافت. همچنین اگر همان اختلاف فشار بین دو طرف غشا وجود داشته باشد، نرخ انتقال جرم آب در فاز مایع می‌تواند ۴۰ برابر نرخ فاز گازی باشد. این اتفاق بیشتر به خاطر اختلاف چند هزار برابری چگالی آنها رخ می‌دهد. هرچند تغییر دانسیته به شکل معکوس بر انتقال مایع اثر می‌گذارد، اما این مسئله از تاثیر مطلوب بر انتقال مایع بسیار کمتر است. این نظریه ثابت می‌کند که تفکیک بخار آب در غشا در حالت چگالش مویبگی می‌تواند هم عامل نرخ انتقال بالا و هم نرخ تفکیک بالا باشد [۲].

### توسعه مدل

زمانی که یکی از ترکیب‌های گاز قابل چگالش بوده و حفره‌ها کوچک هستند، چگالش مویبگی می‌تواند رخ دهد. در این حالت، میعان‌های ایجاد شده می‌توانند نفوذ فاز گازی از طریق حفره‌ها را متوقف نموده و تنها به فاز میعان یافته اجازه عبور بدهند. این نظریه ثابت می‌کند که تفکیک بخار آب در غشا در حالت چگالش مویبگی می‌تواند هم عامل نرخ انتقال بالا و هم نرخ تفکیک بالا باشد [۲ و ۱۸].

در این مقاله، همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، مدل ریاضی دو بعدی جذب بخار آب با فناوری چگالش در حفره‌های غشا با استفاده از جاذب آب مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل‌سازی، محیط غشا همانند یک محیط دوبعدی متخلخل و تمام اجزا به صورت دو فاز یکی بخار آب و فاز دوم اجزای چگالش‌ناپذیر که همراه بخار آب در حفره‌های غشا تا زمان چگالش نفوذ می‌کند، در نظر گرفته شده است.



شکل ۲) شماتیک مدل

شکل (۲) شمانیک مدل مطالعه شده را در دستگاه مختصات استوانه ای نمایش می دهد. جریان متشکل از آب سرد از پایین مدول ( $z=0$ ) (راکتور یا مدول) خورنده می شود. گاز دودکش که متشکل از بخار آب چگال پذیر و سه جزء دیگر، دی اکسید، اکسیژن و نیتروژن، می باشد از قسمت سمت پوسته (SHELL-SIDE) مدول ( $z=L$ ) خورنده می شود و در طول حرکت خود در مدول رطوبت خود را از دست می دهد. همانطور که در مقدمه اشاره شد، غشا به گونه ای مدل سازی می شود که تنها قادر به جذب آب باشد.

### مدل سازی ریاضی

مدل سازی ریاضی یکی از چالش برانگیزترین قسمت های حل یک مسئله بوده و از اهمیت بالایی برخوردار است. از سوی دیگر، فرضیات نیز نقش مهمی در معادلات ما بازی می کنند. بنابراین، حل این بخش از مسئله از اهمیت خاصی برخوردار است. اما در این میان برای حل مسئله و نگارش معادلات حاکم نیاز به انجام فرضیاتی است.

- فرض می کنیم جریان گاز آرام می باشد.
- در حالت مایع جریان آرام و کاملاً توسعه یافته است.
- واکنش شیمیایی در قسمت پوسته (گاز) اتفاق نمی افتد.
- مدول در حالت پایا می باشد.

### معادلات قسمت پوسته (گاز)

در هر بخش بیرون لوله غشا (محل عبور گاز)، غشا و درون لوله غشا (محل عبور مایع جاذب)، معادلات انتقال جرم و حرارت توسط روابط زیر مدل سازی می شود [۶].

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\nabla \cdot N_i + R_i \quad (1)$$

که در آن ( $R_i$ : نرخ واکنش جزء  $i$ ،  $N_i$ : فلاکس انتقال جرم جزء  $i$ ،  $C_i$ : غلظت جزء  $i$ ) می باشد.

با استفاده از قانون فیک و یا توجه به اینکه در بخش بیرون لوله غشا دو گاز  $H_2O$  و  $gas_{non-cond}$  مد نظر هستند، رابطه (۱) به صورت روابط (۲) و (۳) در می آید:

$$D_{H_2O-shell} \left[ \frac{\partial^2 C_{H_2O-shell}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{H_2O-shell}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{H_2O-shell}}{\partial Z^2} \right] = V_{Z-shell} \frac{\partial C_{H_2O-shell}}{\partial Z} \quad (2)$$

$$D_{non-cond} \left[ \frac{\partial^2 C_{non-cond}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{non-cond}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{non-cond}}{\partial Z^2} \right] = V_{Z-shell} \frac{\partial C_{non-cond}}{\partial Z} \quad (۳)$$

که با توجه به توسعه یافته بودن جریان،  $V_{Z-shell}$  از رابطه زیر به دست می آید [۱۷]:

$$V_{Z-shell} = 2V \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{r_2}{r_3} \right)^2 \right) \right] \times \left[ \frac{\left( \frac{r}{r_3} \right)^2 - \left( \frac{r_2}{r_3} \right) + 2 \ln \left( \frac{r_2}{r} \right)}{3 + \left( \frac{r_2}{r_3} \right)^4 - 4 \left( \frac{r_2}{r_3} \right)^2 + 4 \ln \left( \frac{r_2}{r_3} \right)} \right] \quad (۴)$$

که در آن می باشد [۱۷].  $\phi$ : کسر حجم خالی).  $r_3 = r_2 \sqrt{\frac{1}{1-\phi}}$

برای حل معادله این بخش به شرایط مرزی نیاز است که با توجه به سیستم، شرایط مرزی به صورت جدول (۱) می باشد.

جدول (۱) شرایط مرزی در پوسته

معادله	نوع	مکان	
			انتقال جرم
$K_C (C_{i-Shell} - C_{i-Mem})$	شار جابجایی	$Z = L$	
$C_{i-SHELL} = C_{i,in}$	غلظت ورودی	$Z = 0$	
$C_{i-SHELL} = C_{i,membrane}$	پیوستگی پروفایل غلظت	$r = r_2$	
$\frac{\partial C_{i-shell}}{\partial r} = 0$	تقارن	$r = r_3$	
			انتقال حرارت
$h_{r-cond} (T_{FG-Shell} - T_{FG-in})$	شار جابجایی	$Z = L$	
$T_{FG,Shell} = T_{FG,in}$	دمای ثابت ورودی	$Z = 0$	
$q = N.L_W$	گرمای ناشی از تغییر فاز	$r = 0$	
$\frac{\partial T_{FGI}}{\partial r} = 0$	تقارن	$r = r_1$	

از آنجا که توزیع دما در فرایند چگالندی غشایی وجود دارد، معادله انرژی برای بدست آوردن توزیع دما در تماس دهنده غشا لازم است. معادله کلی برای موازنه انرژی که از نظر انتقال حرارت هر دو ترم هدایت و جابجایی در نظر گرفته، به صورت زیر بیان شده است [۴۲].

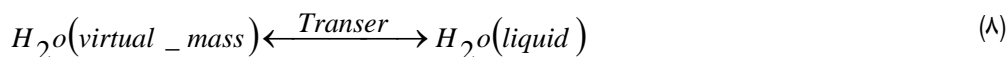
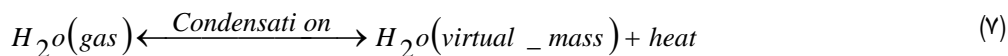
$$\dots C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\} \nabla T + \dots C_p TV) = Q \quad (۵)$$

که در این رابطه  $C_p$  ( $m^2 s^{-2} K^{-1}$ ) ظرفیت گرمایی ویژه،  $T$  (K) دما،  $K$  ( $kg m s^{-3} K^{-1}$ ) هدایت گرمایی، ( $kg m^{-3}$ ) چگالی،  $V$  ( $m s^{-1}$ ) بردار سرعت و  $Q$  ( $kg m^{-1} s^{-3}$ ) ترم چشمه<sup>۱</sup> یا چاه<sup>۲</sup> است. رابطه (۵) در مختصات استوانه‌ای به صورت رابطه (۶) تبدیل شده و با شرایط مرزی جدول (۱) حل گردید.

$$\} FG r \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial T_{FG}}{\partial r}) + \} FG r^2 \frac{\partial T_{FG}}{\partial Y^2} - \dots FG V_{Z-shell} C_p r^2 \frac{\partial T_{FG}}{\partial Z} = 0 \quad (۶)$$

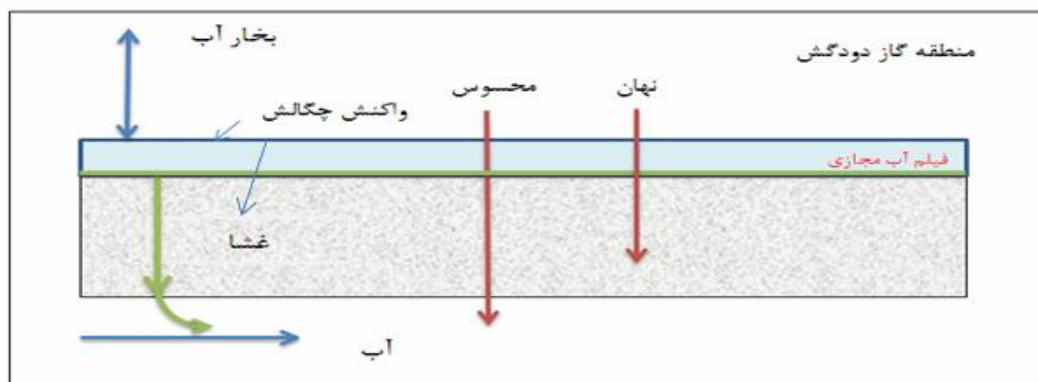
#### مدل ریاضی مربوط به غشا

در این شبیه‌سازی از یک مدل چگالش برای محیط متخلخل غشا برای جداسازی استفاده شده است. این تابع به صورت یک واکنش دو مرحله روی سطح خارجی و محیط متخلخل لوله‌های غشایی در نظر گرفته شده است. فیلم آب مجازی نشان داده شده در شکل (۳) به صورت واکنش شیمیایی در محاسبات معرفی شده است.



1) Source

2) Sink



شکل ۳) مدل نرخ انتقال

در مبدل فولادی چگالش فقط روی سطح خارجی لوله فولادی صورت می‌گیرد و نرخ چگالش بر مبنای تغییرات ورودی و خروجی کسر جرم بخار محاسبه می‌شود که از رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$m_{\text{Condensation}} = \frac{(Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}) \times M \times 273.15}{T_g \times A} \quad (9)$$

در این رابطه  $Q_{in}$  و  $Q_{out}$  نرخ جریان گاز در ورودی و خروجی،  $C_{in}$  و  $C_{outlet}$  غلظت حجمی بخار آب در فاز گاز در ورودی و خروجی،  $T_g$  درجه حرارت واقعی فاز گاز و  $A$  مساحت سطح است.

معادله انتقال اجزاء مخلوط گاز دودکش در محیط متخلخل (غشا) به صورت رابطه (۱۰) تعریف شده است [۴]:

$$\nabla \cdot \Gamma_i + u \cdot \nabla c_i = R_i + S_i \quad (10)$$

جمله عبارت سمت چپ به صورت حاصل جمله شار ناشی از نفوذ و تانسور پراکندگی<sup>۱</sup> است که به صورت رابطه (۱۱) به دست آمده است [۳].

$$N_i = \Gamma_i + uc_i = -(D_{Di} + D_{e,i}) \nabla c_i + uc_i \quad (11)$$

که در این روابط،  $C_i$  غلظت مولی اجزاء،  $S_i$  نرخ اضافه شده ( $S_i=0$  در این بررسی)،  $R_i$  نرخ خالص تولید به وسیله واکنش شیمیایی است. در این محاسبات، فرض  $Y_W = 1$  حاکم است. با فرضیات حاکم معادله به فرم رابطه زیر به دست می‌آید و توسط شرایط مرزی جدول (۲) حل شده است [۴].

1) Dispersion tensor

$$D_{wt-Mem} \left[ \frac{\partial^2 C_{wt-Mem}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{wt-Mem}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{wt-Mem}}{\partial Z^2} \right] + R_i = 0 \quad (12)$$

نرخ واکنش شیمیایی اجزاء (چگالش بخار آب) به صورت رابطه (۱۳) تعریف شده است:

$$R_{wt} = K_1 \frac{P_{vapor} - P_{sat}}{R.M \left( \frac{T_{Cold} + T_{vapor}}{2} \right)} \quad (13)$$

در این رابطه،  $P_{vapor}$  فشار بخار آب،  $P_{sat}$  فشار اشباع،  $T_{cold}$  دمای سیال سرد،  $T_{vapor}$  دمای گاز،  $R$  ثابت جهانی گازها،  $M$  جرم مولکولی و  $K_1$  ثابت واکنش ناشی از تغییر فاز بخار آب است. ثابت  $K_1$  با توجه به رابطه بین دمای سیال و فشار بخار آب به دست آمده است:

$$K_1 = 0.38 \frac{T_{cold}}{T_{vapor}} \quad (14)$$

معادله انتقال گرما در محیط متخلخل به صورت رابطه (۱۵) تعریف [۷] و توسط شرایط مرزی دما در جدول (۳) حل شده است.

$$\dots c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\}_{eqq} \nabla T) + Q \quad (15)$$

$$\}_{eqq} = v_p \} P + (1 - v_p) \} \quad (16)$$

که در این رابطه  $\varepsilon_p$  کسر حجمی فضای خالی ماده متخلخل است.

جدول (۲) شرایط مرزی غلظت برای غشا

نوع شرط مرزی	شرط مرزی	موقعیت
به دلیل پیوستگی غلظت	$C_{wt-Mem} = C_{wt-gas}$	$r = r_{out}$
فشار چگالش	$C_{wt-Mem} = \frac{P_{wt}^{sat}}{RT_{wt}}$	$r = r_{in}$
ایزوله	$\frac{\partial C_{i-Mem}}{\partial Y} = 0$	$Y = 0$
ایزوله	$\frac{\partial C_{i-Mem}}{\partial Z} = 0$	$Y = L$

جدول (۳) شرایط مرزی دما برای غشا

موقعیت	شرط مرزی	نوع شرط مرزی
$r = r_{out}$	$T_{Mem} = T_{FG}$	دما ثابت
$r = r_{in}$	$T_{Mem} = T_{wt-tube}$	دما ثابت
$Y = 0$	$\frac{\partial T_{Mem}}{\partial Z} = 0$	ایزوله
$Y = L$	$\frac{\partial T_{Mem}}{\partial Z} = 0$	ایزوله

## معادلات قسمت لوله (تراویده)

زمانی که آب در حالت فاز مایع از حفره های غشا به جریان آب داخل لوله های غشایی تراویده می شود، معادله انرژی برای سمت مایع و تماس دهنده غشایی به کار می رود [۶]:

$$\left\}_{wt} r \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_{wt}}{\partial r} \right) + \left\}_{wtG} r^2 \frac{\partial T_{wt}}{\partial Z^2} - \dots_{FG} V_{Z-tube} C_P r^2 \frac{\partial T_{wt}}{\partial Z} = 0 \quad (17)$$

که در این رابطه،  $T_{wt}$  دمای سیال،  $\lambda$  ضریب هدایت گرمایی جریان داخل لوله آب،  $V_{Z-tube}$  سرعت آب در جهت  $Z$ ،  $\rho_{FG}$  چگالی گاز دودگش و  $C_P$  ظرفیت گرمایی ویژه آب می باشد. با توجه به فرضی که برای نمودار سرعت مایع انجام شده است (جریان آرام سهمی شکل کاملاً توسعه یافته)، در مورد  $V_{Z-tube}$  رابطه (۱۸) برقرار است [۸]. شرایط مرزی در جدول (۴) آورده شده است:

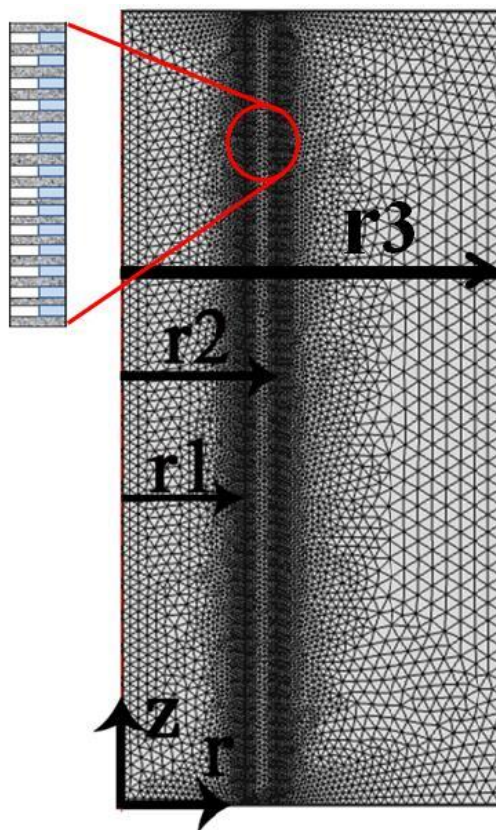
$$V_{Z-tube} = 2V \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_1} \right)^2 \right] \quad (18)$$

جدول ۴) شرایط مرزی دمای سمت لوله

موقعیت	شرط مرزی	نوع شرط مرزی
$Z=L$	$T_{Wt-tube} = T_{wt,In}$	دمای ثابت ورودی
$Z=0$	$h_{wt} (T_{wt-tube} - T_{wt-in})$	شار جابجایی
$\Gamma=\Gamma_2$	$T_{Wt-tube} = T_{mem}$	دما ثابت
$\Gamma=\Gamma_1$	$\frac{\partial T_{wt-tube}}{\partial r} = 0$	ایزوله

## روش حل

معادلات انتقال جرم و حرارت برای هر ۳ بخش تماس‌دهنده شامل فیبر، غشا و پوسته با شرایط مرزی ارائه شده با استفاده از نرم افزار کامسول که از روش عددی المان محدود برای حل معادلات دیفرانسیل استفاده می‌کند حل گردید. برای حل عددی معادلات، ابتدا باید دامنه مدل شبکه‌بندی گردد. نرم افزار شبکه‌هایی به صورت سه ضلعی ایجاد می‌کند. شکل (۴) این شبکه‌بندی را نشان می‌دهد. تعداد کل شبکه‌ها برابر ۵۱۷۳۰ هزار می‌باشد. در نقاطی که گرادیان غلظت بخار آب بیشتر است، تعداد شبکه‌ها کوچک‌تر است. برای تعیین شبکه‌های بهینه، نرم‌افزار کامسول از یک تابع تحت عنوان Adaptive Mesh Solver استفاده می‌کند. این تابع شبکه‌ها را به حداقل می‌رساند و در نقاطی از دامنه که گرادیان غلظت بالا می‌باشد از یک ضریب برای کاهش یکنواخت اندازه شبکه‌ها استفاده می‌کند. این تابع برای مسائل ساکن و پیچیده غیر خطی یا مقادیر ویژه مناسب می‌باشد. مجموعه معادلات غیر خطی بدست آمده تبدیل به مدل خطی شده و سپس این مدل خطی با استفاده از حل کننده UMFPACK (از روش حذفی گاوس استفاده می‌کند) حل شد. همچنین برای تعریف موقعیت چگالش از نرم افزار متلب ویرایش ۲۰۰۹ استفاده شده که برای متصل کردن آن با نرم افزار Comsol از یک برنامه جانبی مادر در متلب استفاده شده است.

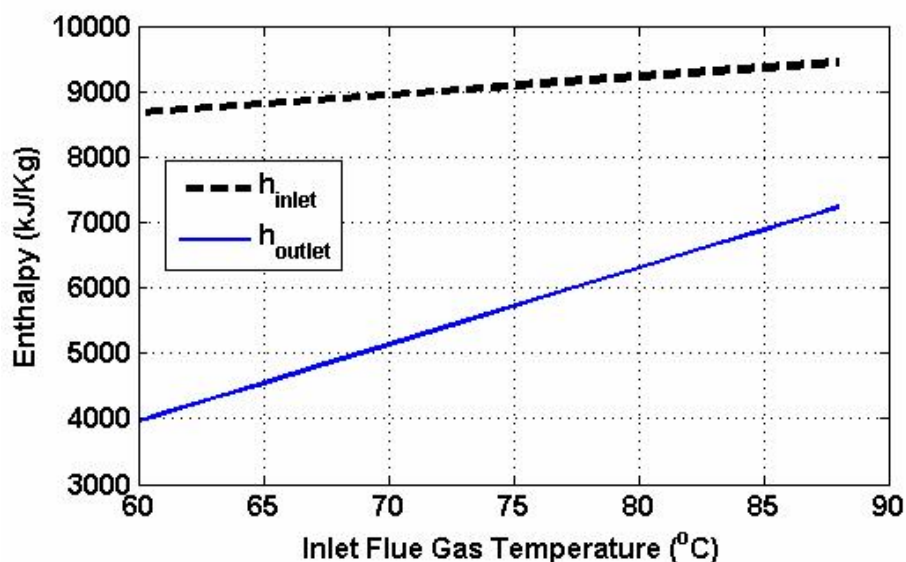


شکل ۴) مش بندی سه قسمت مبدل غشایی در دو بعد

## نتایج و بحث

### بررسی انتقال حرارت در فرایند

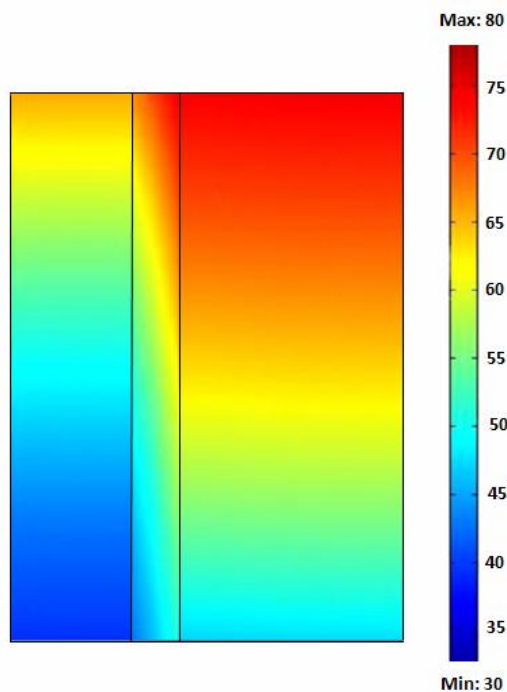
تغییر آنتالپی ( $\Delta h = h_{outlet} - h_{inlet}$ ) گاز دودکش در شکل (۵) نشان داده شده است. در واقع تغییر آنتالپی مذکور معادل انرژی بازیافت شده توسط مدول غشایی می‌باشد. مقادیر آنتالپی در هر دو جریان ورودی و خروجی با افزایش دما افزایش یافته است هر چند آنتالپی در خروجی در مقایسه با ورودی به آرامی افزایش می‌دهد. انرژی حرارتی بازیافت شده با افزایش دما گاز دودکش به صورت خطی افزایش یافته است.



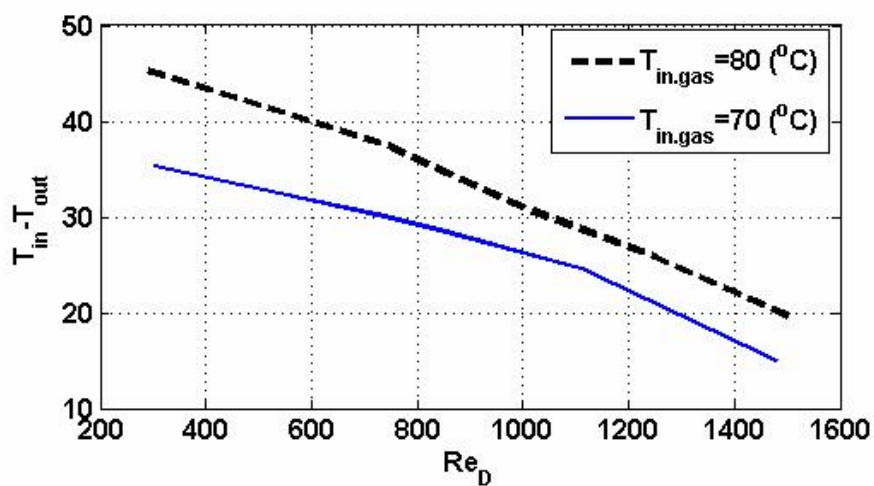
شکل ۵) نمودار تاثیر دما گاز دودکش بر حسب آنتالپی

#### تاثیر پارامترهای جریان بر بازیافت حرارت

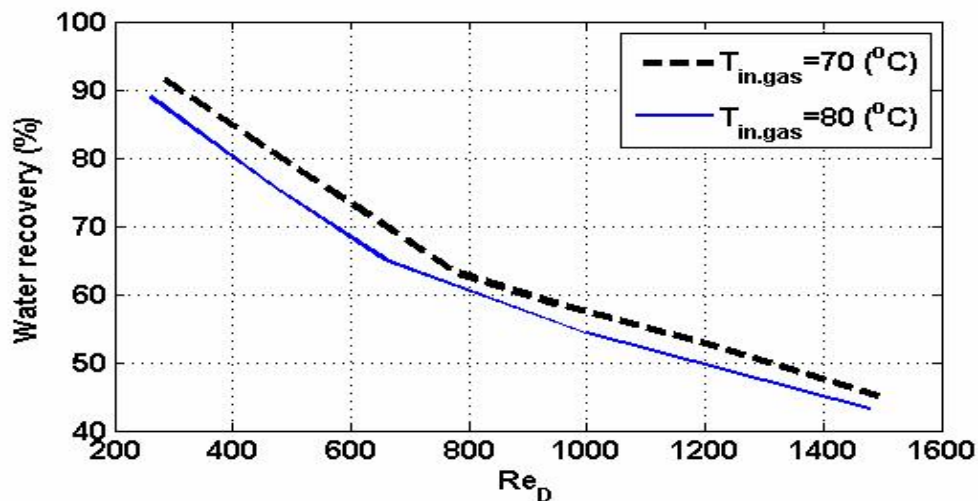
توزیع دما برای تماس‌دهنده غشایی توسط دینامیک سیالات محاسباتی در شکل (۶) نشان داده شده است. جهت جریان آب (از پایین به بالا) و جریان گاز از پایین به بالا می‌باشد و با توجه به انتقال گرما بین دو جریان، گاز دودکش توسط آب سرد شده و حرارت زاید بازیافت گردیده است. تاثیر عدد رینولدز بر اختلاف دمای ورودی و خروجی گاز دودکش در شکل (۷) نشان داده شده است. مشخص شد که با افزایش عدد رینولدز اختلاف دما کاهش و به دنبال آن بازیافت حرارتی کاهش می‌یابد. در شکل (۸) تاثیر عدد رینولدز بر بازیافت جرمی نشان داده شده است که با افزایش عدد رینولدز بازیافت بخار آب کاهش یافته است گرچه با افزایش سرعت ورودی گاز دودکش، انتقال جرم جابجایی افزایش خواهد یافت. در محدوده پارامتر بررسی شده به علت اختلاف درجه حرارت بین گاز دودکش و آب خنک‌کننده، فرایند چگالش غالب بر انتقال جرم جابجایی است و سبب افزایش بازیافت بخار آب می‌شود.



شکل ۶) توزیع دما در طول مدول، دمای جریان سیال سرد ورودی (30 °C) و دمای گاز ورودی (80 °C)

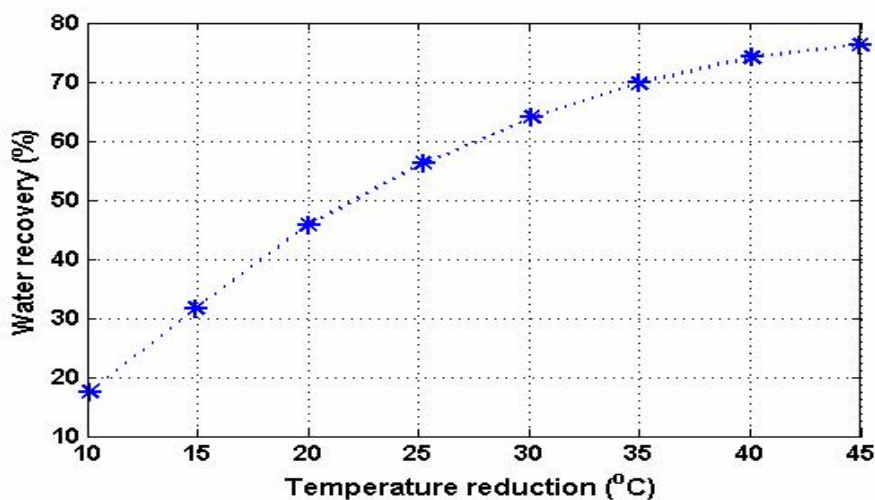


شکل ۷) نمودار تاثیر عدد رینولدز جریان گاز بر حسب تفاوت دمایی فاز گاز دودکش



شکل ۸) نمودار تاثیر عدد رینولدز بر بازیافت جرمی بخار آب، در دو دمای مختلف گاز دودکش

تاثیر دمای گاز دودکش در شکل (۹) نشان داده شده است. کاهش دمای گاز دودکش سبب افزایش بازیافت آب می‌شود. در واقع، کاهش دما کمتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش بیشتر بازیافت آب شده است. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده، برای بازیابی حدود ۲۰ درصد از آب هدر رفته در صنعت نیاز به کاهش دمای حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.



شکل ۹) نمودار درصد بازیافت آب برحسب کاهش دمای گاز دودکش (درصد آب ۱۱ ، دمای گاز دودکش ۸۰ °C ، دمای سیال سرد ۲۵ °C)

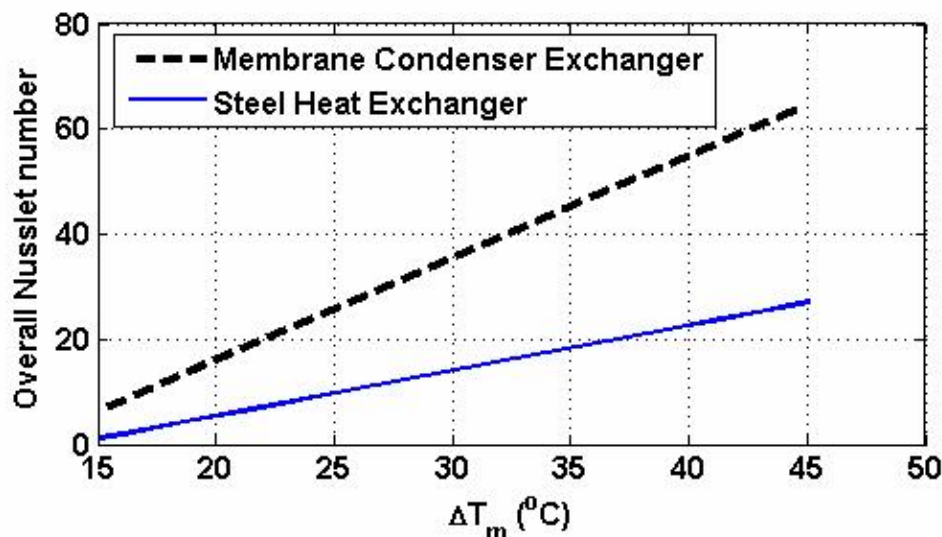
## مقایسه انتقال حرارت موضعی مبدل چگالنده غشایی با مبدل حرارتی فولادی

اختلاف بین ضریب انتقال جرم مبدل حرارتی و مبدل غشایی در شکل (۱۰) نشان داده است، ضریب انتقال جرم،  $k_m$  در لوله‌های چگالنده به صورت زیر تعریف شده است.

$$k_m = \frac{m_{cond}}{A} \quad (19)$$

که در این رابطه،  $A$  مساحت سطح لوله‌ها و  $m_{cond}$  نرخ چگالش می‌باشد. در مبدل‌های حرارتی فولادی همان میزان چگالش روی سطوح است در حالی که در لوله‌های متخلخل به همراه میزان آبی که در حفره‌ها چگالش می‌شود همراه می‌باشد که مقدار بالاتری می‌باشد.

$\Delta T_m$  اختلاف دمای متوسط در مبدل، که اختلاف دمای بین سیال سرد و گاز دودکش  $\Delta T_m = \bar{T}_{FG} - \bar{T}_w$  می‌باشد. ضریب انتقال جرم برای غشا متخلخل ۶۰ تا ۸۰ بیشتر از فولاد نفوذناپذیر در همان اختلاف دمای میانگین (اختلاف دمای سیال سرد و گاز دودکش) می‌باشد، زیرا مقاومت اضافی در سمت گاز دودکش ناشی از انباشته شدن مایع چگالش برای لوله نفوذناپذیر برای غشا متخلخل حذف شده است.



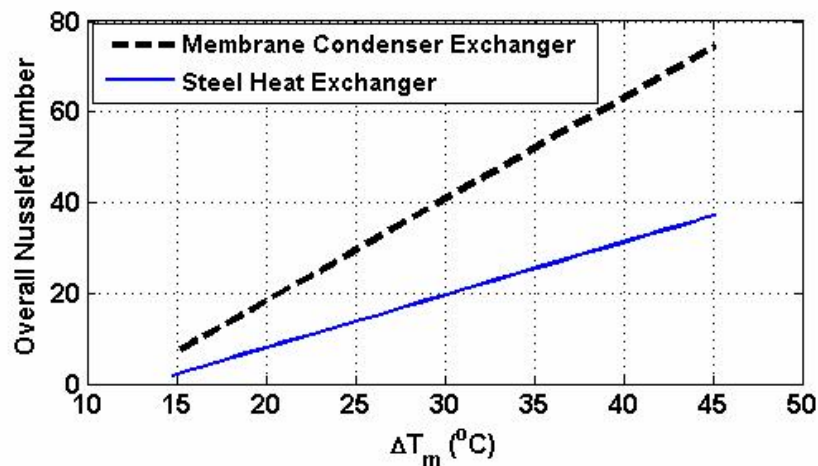
شکل ۱۰) نمودار ضریب انتقال جرم بر حسب اختلاف دما در مبدل حرارتی و مبدل غشایی،  $Re = 280$

در شکل (۱۱) با مقایسه عدد ناسلت در مبدل غشایی با مبدل حرارتی فولادی ثابت شد که عدد ناسلت مبدل غشایی ۷۰ بزرگتر از مبدل حرارتی می‌باشد، زیرا در مبدل غشایی چگالش در حفره‌ها یا در سطح صورت می‌گیرد که از حفره‌ها

عبور می‌کند و در سطح غشا تجمع صورت نمی‌گیرد، به عبارتی، دارای ضریب انتقال حرارت بالاتری نسبت به مبدل حرارتی می‌باشد. برای بررسی عدد ناسلت ضریب انتقال حرارت سمت گاز در مبدل غشایی محاسبه شد که در رابطه (۲۰) نتیجه ذکر شده است.

$$Nu_{Membrane} = \frac{w_s d}{n f d_o L \left[ \Delta T_m \frac{w_s + w_L}{2 n f} \ln \left( \frac{d_o}{d_i} \right) \frac{w_s + w_L}{n h_w n d_i L} \right] k} \quad (20)$$

که در این معادله  $o_1$  و  $o_2$  به ترتیب گرمای نهان و محسوس،  $h_w$  ضریب انتقال حرارت سمت جریان آب می‌باشد.



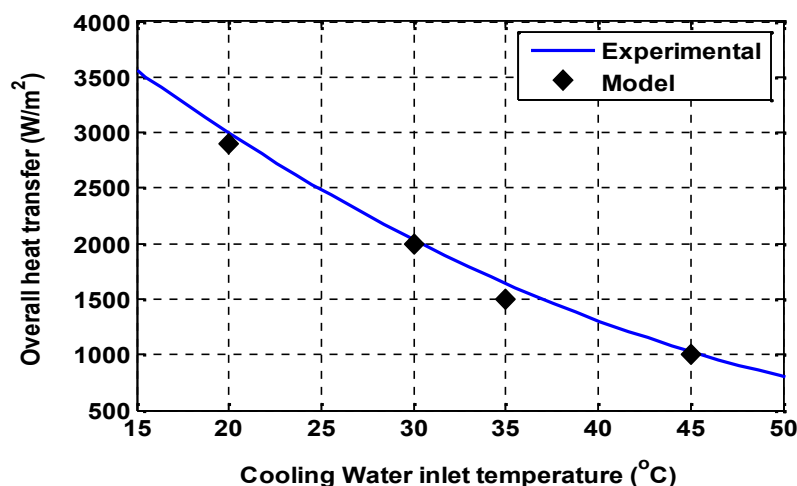
شکل (۱۱) نمودار عدد ناسلت بر حسب اختلاف دما در مبدل حرارتی و مبدل غشایی،  $Re = 280$

### اعتبار سنجی

مدل پیشنهاد شده با استفاده از نتایج تجربی توسط وانگ<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفت تا صحت مدل اثبات شود [۲]. در شکل (۱۲) مقایسه مدل ارائه شده با داده‌های تجربی توافق خوبی را نشان می‌دهد. تاثیر دما سیال سرد بر بازیافت حرارت نشان می‌دهد که با کاهش دمای سیال سرد، بازیافت حرارت افزایش می‌یابد که این می‌تواند یک واقعیت باشد. در واقع، کاهش دما فاز مایع تاثیر مستقیم در ضریب نفوذ موینگی دارد، زیرا باعث افزایش ضریب چگالش موینگی در

1) Wang et al.

حفره‌های غشا می‌شود. در نتیجه، نرخ چگالش بخار آب در حفره‌های غشا افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲) نمودار تاثیر دمای سیال سرد بر شار انتقال حرارت کلی (دمای گاز دودکش ورودی  $80^{\circ}\text{C}$ ، دبی گاز دودکش  $60\text{ m}^3/\text{h}$ ، کسر حجم  $\text{H}_2\text{O}$  در خوراگ گاز ۱۱٪)

### نتیجه گیری

در مقاله حاضر، مدل سازی جذب بخار آب و انرژی گرمایی هدررفت از صنایع گازی در مبدل غشایی با استفاده از آب به عنوان جاذب انجام شده است. در مدل سازی، حالت چگالش مویینگی در حفره‌های غشا در نظر گرفته شده است. روند تغییرات غلظت و دما در مبدل غشایی مورد بررسی قرار گرفت.

■ بالا بودن دمای گاز دودکش از یک جهت تاثیر مثبت روی بازیافت حرارت دارد، اما از این جهت که بر روی نرخ چگالش مویینگی تاثیر منفی (کاهش تراوش غشا) می‌گذارد، پارامتری منفی در نرخ بازیافت جرم محسوب می‌شود. پایین بودن دمای سیال سرد ورودی سبب افزایش بازیافت بخار آب و حرارت شد.

■ با مقایسه عدد ناسلت در مبدل غشایی با مبدل حرارتی فولادی ثابت شد که عدد ناسلت آن ۶۰ تا ۷۰٪ بزرگتر می‌باشد، زیرا در مبدل غشایی چگالش در حفره‌ها یا در سطح صورت می‌گیرد که از حفره‌ها عبور می‌کند و نسبت به مبدل فولادی دارای تجمع روی سطح نمی‌باشد.

■ غشاهای سرامیکی ریزحفره با سازوکار چگالش مویینگی در حفره‌ها کار می‌کنند. به دلیل انتقال آب از طریق حفره‌ها، این نوع غشاها دارای ضریب انتقال جرمی در حدود ۶۰ تا ۸۰ بیشتر نسبت به لوله‌های فولادی می‌باشند.

## منابع

- [1] Al-Marzouqi, M.H., El-Naas, M.H., Marzouk, S.A.M., Al-Zarooni, M.A., Abdullatif, N., Faiz, R., Modeling of CO<sub>2</sub> absorption in membrane contactors, *Separation and Purification Technology*, 59 (2008) 286-293.
- [2] Bao, A., Wang, D., Lin, C.X., 2011, Nanoporous Membrane Tube Condensing Heat Transfer Enhancement Study, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 63530.
- [3] Beerlage, M. A. M., Zeijnsink, A. G. L., 2000, Preparation of water from flue gases, WO 0,056,426.
- [4] Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N., 1960, Transport Phenomena, John Wiley & Sons, New York.
- [5] Caro, J., Noack, M., 2008. Zeolite membranes – recent developments and progress. *Microporous and Mesoporous Materials* 115 (3), 215e233.
- [6] Drioli, E., Criscuoli, A., Curcio, E., 2006, Membrane Contactors: Fundamentals, Applications, and Potentialities, Elsevier, Amsterdam.
- [7] eeley, T., Pletche, J., Carney, B., McNemar, B.T., 2006, Department of Energy/National Energy Technology Laboratory's Power Plant-Water R&D Program, Power-Gen International.
- [8] Ghadiri, M., Marjani, M., Shirazian, S., Mathematical modeling and simulation of CO<sub>2</sub> stripping from monoethanolamine solution using nano porous membrane contactors, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, (2013).
- [9] Hoang, M., Nguyen, C., 2009, Membrane and process for steam separation, purification and recovery. Australian Patent PCT/AU2009/000386.
- [10] Judd, S., Jefferson, B., 2003, Membrane for Industrial Wastewater Recovery and Re-use; Elsevier Science Ltd: Oxford, UK.
- [11] Liu, X., Zhang, Y., Qu, K., 2006, Experimental study on mass transfer performances of cross flow dehumidifier using liquid desiccant, *Energy Conversion and Management*, 47, 2682–2692.
- [12] Mulder, M., 1997, Basic Principles of Membrane Technology, Kluwer Academic Publishers, Amsterdam.
- [13] Rabovitser, I., Knight, R., Remick, R., 2003, Method and apparatus for selective removal of a condensable component from a process stream with latent heat recovery, US Patent No. 6517,607 B2, Feb. 11.
- [14] Sijbesma, H., Nymeyer, K., van Marwijk, R., Heijboer, R., Potreck, J., Wessling, M., 2008, Flue gas dehydration using polymer membranes. *Journal of Membrane Science*, 313, 263–276.
- [15] Spiegelman, J.J., Blethen, R.D., 2006. Method of producing high purity steam. US Patent PCT/US2006/035790.
- [16] Scovazzo, P., Hoehn, A., Todd, T., 2000, Membrane porosity and hydrophilic membrane-based dehumidification performance. *Journal of Membrane Science*, 167, 217–225.

- 
- [17] Shirazian, S., Moghadassi, A., Moradi, S., Numerical simulation of mass transfer in gas-liquid hollow fiber membrane contactors for laminar flow conditions, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17 (2009) 708-718.
- [18] Vercauteren, S., Keizer, K., 1998, Porous ceramic membranes: preparation, transport properties and applications, *Journal of Porous Materials*, 5, 241-258.
- [19] Wang, D, 2011, Advanced Energy and Water Recovery Technology from Low Grade Waste Heat, Project Final Report, DE-EE000347.
- [20] Wang, D, 2012, Transport Membrane Condenser for Water and Energy Recovery from Power Plant Flue Gas, Project Final Report, DOE Award Number DE-NT0005350

## فهرست علائم

A	$m^2$	مساحت سطح
C	$mol\ m^{-3}$	غلظت
D	$m\ s^{-2}$	ضریب نفوذ
D	M	قطر
H	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$	ضریب انتقال حرارت ضریب انتقال جرم
K	$m\ s^{-1}$	
$J_i$	$mol\ m^2\ s^{-1}$	شار جزء i
M	$kg\ mol^{-1}$	وزن مولکولی
P	Pa	فشار
Q	$m^3\ s^{-1}$	شدت حجمی
R	$Pa\ m^3\ kmol^{-1}\ K^{-1}$	ثابت جهانی گازها
R	M	شعاع
T	$^{\circ}C$	دما
V	$m\ s^{-1}$	سرعت
$\epsilon_m$	—	ضریب تخلخل
$\delta$	M	ضخامت
	$kg\ m^2\ s^{-1}$	ویسکوزیته
$\lambda$	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$	ضریب هدایت گرمایی
$\rho$	$kg\ m^{-3}$	چگالی