تئوری جدید برای کاهش هزینه‌های انرژی صنایع گازی توسط فناوری غشایی

موسی توانا [۱]، نظام الدین اشرفی زاده [۲]، عیسی توانا [۳]

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 مویینگی 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

۱) کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران mousatavana@chemeng.iust.ac.ir
۲) دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران (نویسندهٔ مسئول) ashrafi@iust.ac.ir
۳) کارشناسی مهندسی پلیمر، دانشگاه آزاد واحد بوشهر tavana.esia @yahoo.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

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 مهم ترین گازهای گلخانه ای 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 DE-FC26−06NT42727.2,4 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 جریان های 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 (معمولا 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 حرارت های نزدیک به ۱۰۰ درجه سانتی گراد یا بالاتر از آن گزارش شده است [۱۵]. غشاهای کامپوزیتی نانوذرات PVA/ سیلیکا برای بازیافت بخار مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و شار بخار آب Kg/m^2h ۱۵۰-۷۰ دراختلاف فشار bar ۶ به دست آمده است [۹]. دستگاه جذب بخاری که از غشاء زئولیتی استفاده می‌کرد، در کارخانه تولید قند به کار گرفته شد و شارهای بسیار بالای Kg/m^2h ۱۱/۹، ۱۴/۹، ۱۷/۶و ۲۲/۴ به ترتیب در $^{\circ}C$ ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۲۰ و ۱۳۰ گزارش شد [۵]. ژانگ[1] و همکارانش نشان دادند که نسبت نفوذپذیری آب به هوا برای

1) Zhang et al.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

غشا آب دوست، محدوده‌ای بین ۴۶۰ تا ۳۰۰۰۰ دارد. به بیان دیگر، به غیر از بخار آب، دیگر گازها به نـدرت مـی‌تواننـد از چنین غشاهایی بگذرند [۱۹] . مزیت استفاده از این نوع غشا برای جداسازی بخار آب از مخلوط بخار/گاز ، در نیروی بـین 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 روش ها بیش از پیش شده اسـت [۱۱].

مطالعات آزمایشگاهی نشان داد که یک غشا نانوسرامیکی متخلخل که میانگین اندازه منافذ آن ۶ نانومتر باشد، هنگامی که درحالت انتقال نفوذ نادسن 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 مویینگی در غشا متخلخل به وجود می‌آید. سپس شار انتقال بخار آب تا بیش از ۵ برابر میزان اندازه‌گیری شده برای حالت نفوذ نادسن، افزایش می‌یابد و نسبت تفکیک تا بیش از ۱۰۰ برابر بهبود پیدا می‌کند. در نتیجه، مرحله چگالش مویینگی 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 نسبتا جدیدی در بازیابی گرمای اتلافی دارد و در حال حاضر تنها توسط شرکت گاز کالیفرنیای 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[1] 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 اخیرا برای شبیه سازی فرایندهای غشایی مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها تاکنون برای شبیه سازی فرایندهای غشایی شامل میکرو فیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، 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 می رسد. در این مقاله، به مدل سازی 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

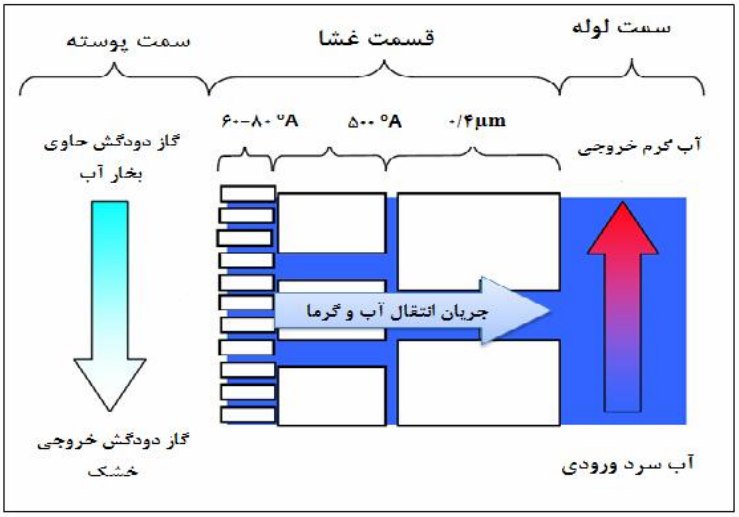
1) Liu et al.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

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 نسبتا 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 کلوین پیش بینی می‌کند چنانچه فشار جزیی آن جزء ترکیب پایین‌تر از فشار بخارش باشد، در حفره‌های ریز چگالش می‌تواند رخ دهد. در بسیاری موارد، چگالش مویینگی در۵۰ 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

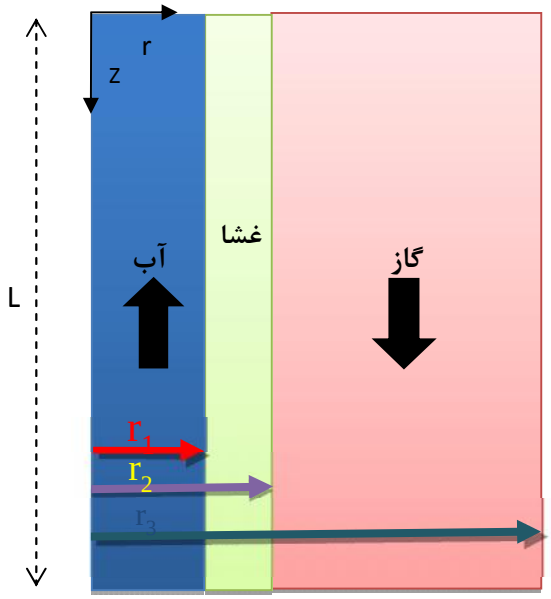
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

کم بوده و به میزان انحلال‌پذیری 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 مویینگی 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 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. این نظریه ثابت می‌کند که تفکیک بخار آب در غشا در حالت چگالش مویینگی می‌تواند هم عامل نرخ انتقال بالا و هم نرخ تفکیک بالا باشد [۲و ۱۸]

در این مقاله، همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، مدل ریاضی دو بعدی جذب بخار آب با فناوری چگالش در حفره های 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 حفره های غشا تا زمان چگالش نفوذ می‌کند، در نظر گرفته شده است.



شکل ۲)شماتیک مدل

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

شکل (۲) شماتیک 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) خورانده می شود. گاز دودکش که متشکل از بخار آب چگال پذیر و سه جزء دیگر، دی اکسید، اکسیژن و نیتروژن، می‌باشد از قسمت سمت پوسته (SHELL-SIDE) مدول (z=L) خورانده می شود و در طول حرکت خود در مدول رطوبت خود را از دست می دهد. همانطور که در مقدمه اشاره شد، غشا به گونه‌ای مدل‌سازی می شود که تنها قادر به جذب آب باشد.

مدل‌سازی ریاضی

مدل‌سازی ریاضی یکی از چالش برانگیز ترین 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 می‌کنیم جریان گاز آرام می باشد.
- در حالت مایع جریان آرام و کاملا 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 مدل‌سازی می‌شود [۶].

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\nabla . N_i + R_i \qquad (۱)$$

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 $gas_{non\text{-}cond}$ مد نظر هستند، رابطه (۱) به صورت روابط (۲) و (۳) در می‌آید:

$$D_{H_2O-shell}\left[\frac{\partial^2 C_{H_2O-shell}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial C_{H_2O-shell}}{\partial r}+\frac{\partial^2 C_{H_2O-shell}}{\partial Z^2}\right]=V_{Z-shell}\frac{\partial C_{H_2O-shell}}{\partial Z} \qquad (۲)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

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

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

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

که در آن $r_3=r_2\sqrt{\frac{1}{(1-\varphi)}}$ می‌باشد [۱۷]. (φ: کسر حجم خالی).

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

جدول ۱) شرایط مرزی در پوسته

	مکان	نوع	معادله
انتقال جرم			
	$Z=L$	شار جابجایی	$K_C(C_{i-Shell}-C_{i-Mem})$
	$Z=0$	غلظت ورودی	$C_{i-SHELL}=C_{i,in}$
	$r=r2$	پیوستگی پروفایل غلظت	$C_{i-SHELL}=C_{i,membrane}$
	$r=r3$	تقارن	$\frac{\partial C_{i-shell}}{\partial r}=0$
انتقال حرارت			
	$Z=L$	شار جابجایی	$h_{a-cond}(T_{FG-Shell}-T_{FG-in})$
	$Z=0$	دمای ثابت ورودی	$T_{FG,Sheel}=T_{FG,In}$
	$r=0$	گرمای ناشی از تغییر فاز	$q=N.L_W$
	$r=r1$	تقارن	$\frac{\partial T_{FGl}}{\partial r}=0$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

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

$$^{\circ}C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla.\left(-\,^{a}\nabla T + {}^{\circ}C_P TV\right) = Q \qquad (۵)$$

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

$$^{a}{}_{FG} r \frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial T_{FG}}{\partial r}\right) + {}^{a}{}_{FG} r^2 \frac{\partial T_{FG}}{\partial Y^2} - {}^{\circ}{}_{FG} V_{Z-shell} C_P r^2 \frac{\partial T_{FG}}{\partial Z} = 0 \qquad (۶)$$

مدل ریاضی مربوط به غشا

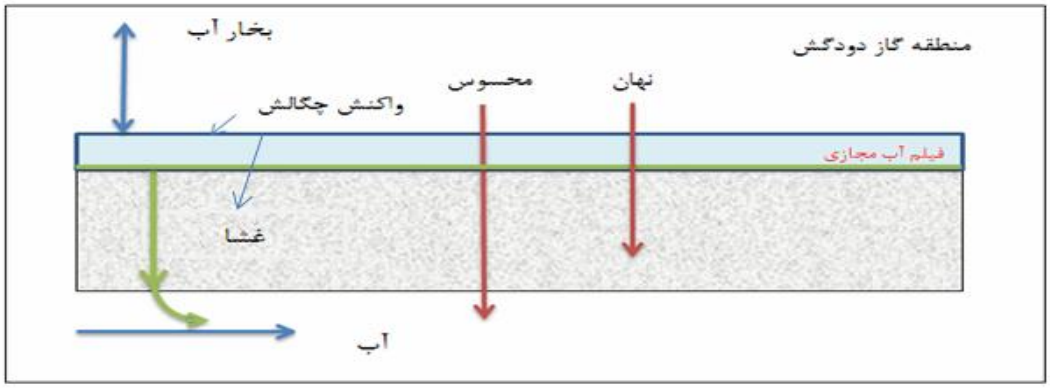
در این شبیه‌سازی از یک مدل چگالش برای محیط متخلخل غشا برای جداسازی استفاده شده است. این تـابع بـه صورت یک واکنش دو مرحله روی سطح خارجی و محیط متخلخل لوله‌های غشایی در نظر گرفتـه شـده اسـت. فـیلم آب مجازی نشان داده شده در شکل (۳) به صورت واکنش شیمیایی در محاسبات معرفی شده است.

$$H_2o(gas) \xleftarrow{Condensati\ on} H_2o(virtual\ _\ mass) + heat \qquad (۷)$$

$$H_2o(virtual\ _\ mass) \xleftarrow{Transer} H_2o(liquid) \qquad (۸)$$

1) Source
2) Sink

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]



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:

$$m_{Condesation} = \frac{\left(Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}\right) \times M \times 273.15}{T_g \times A} \qquad (۹)$$

در این رابطه $Q_{in}(m^3/h)$ و Q_{outlet} 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]:

$$\nabla.\Gamma_i + u.\nabla c_i = R_i + S_i \qquad (۱۰)$$

جمله عبارت سمت چپ به صورت حاصل جمله شار ناشی از نفوذ و تانسور پراکندگی[1] است که به صورت رابطه (۱۱) به دست آمده است [۳].

$$N_i = \Gamma_i + uc_i = -(D_{Di} + D_{e,i})\nabla c_i + uc_i \qquad (۱۱)$$

که در این روابط، C_i غلظت مولی اجزا، 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

$$D_{wt-Mem}\left[\frac{\partial^2 C_{wt-Mem}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial C_{wt-Mem}}{\partial r}+\frac{\partial^2 C_{wt-Mem}}{\partial Z^2}\right]+R_i=0 \qquad (۱۲)$$

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

$$R_{wt}=K_1\frac{P_{vapor}-P_{sat}}{R.M\left(\frac{T_{Cold}+T_{vapor}}{2}\right)} \qquad (۱۳)$$

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 :

$$K_1=0.38\frac{T_{cold}}{T_{vapor}} \qquad (۱۴)$$

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

$$^{\circ}c_P u.\nabla T=\nabla.(^{a}_{eqq}\nabla T)+Q \qquad (۱۵)$$

$$^{a}_{eqq}=£_P\,^{a}_{P}+(1-£_P)^{a} \qquad (۱۶)$$

که در این رابطه ε_p کسر حجمی فضای خالی ماده متخلخل است.

جدول ۲) شرایط مرزی غلظت برای غشا

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

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 لوله‌های غشایی تراویده می‌شود، معادله انرژی برای سمت مایع و تماس‌دهنده غشایی به کار می رود [۶]:

$$a_{Wt} r \frac{\partial}{\partial r}(r \frac{\partial T_{wt}}{\partial r}) + a_{wtG} r^2 \frac{\partial T_{wt}}{\partial Z^2} - \circ_{FG} V_{Z-tube} C_P r^2 \frac{\partial T_{wt}}{\partial Z} = 0 \qquad (۱۷)$$

که در این رابطه، T_{wt} دمای سیال، λ_w ضریب هدایت گرمایی جریان داخل لوله آب، V_{Z-tube} سرعت آب در جهت Z، ρ_{FG} چگالی گاز دودگش و C_p ظرفیت گرمایی ویژه آب می باشد. با توجه به فرضی که بـرای نمـودار سـرعت مـایع انجام شده است (جریان آرام سهمی شکل کاملا توسعه یافته)، در مورد $V_{Z\text{-}tube}$ رابطه (۱۸) برقرار است [۸]. شرایط مرزی در جدول (۴) آورده شده است:

$$V_{Z-tube} = 2V\left[1 - (\frac{r}{R_1})^2\right] \qquad (۱۸)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

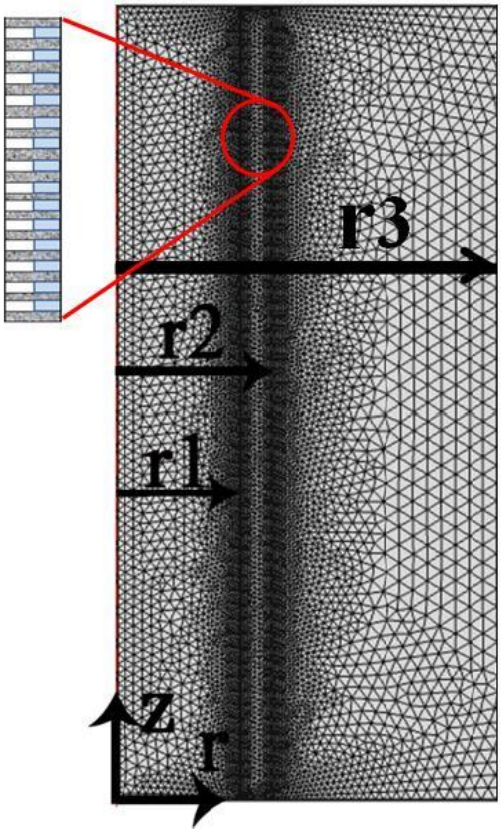
جدول ٤) شرایط مرزی دمای سمت لوله

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
$r=r_2$	$T_{Wt-tube} = T_{mem}$	دما ثابت
$r=r_1$	$\frac{\partial T_{wt-tubel}}{\partial r} = 0$	ایزوله

روش حل

معادلات انتقال جرم و حرارت برای هر ۳ بخش تماس‌دهنده شامل فیبر، غشا و پوسته با شرایط مرزی ارایه 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]



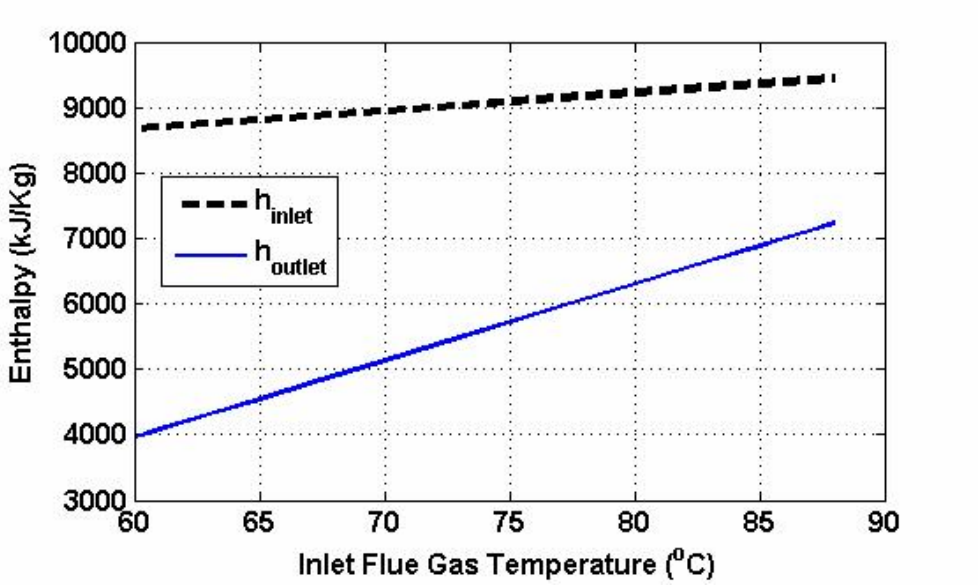
شکل٤) مش بندی سه قسمت مبدل غشایی در دو بعد

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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

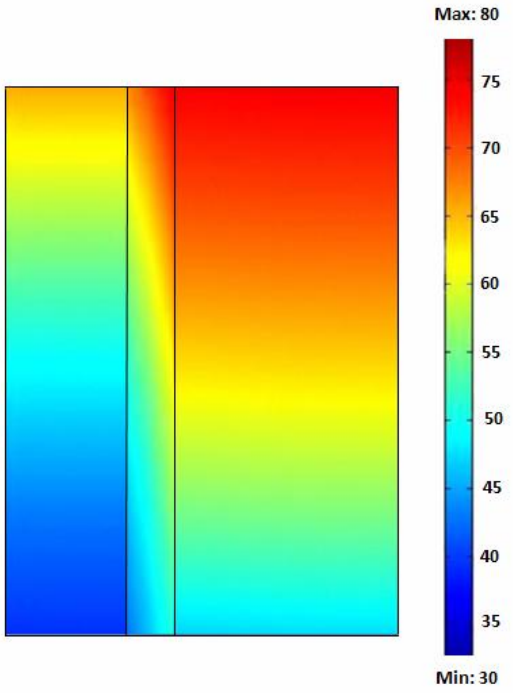


شکل ۵) نمودار تاثیر دما گاز دودکش بر حسب آنتالپی

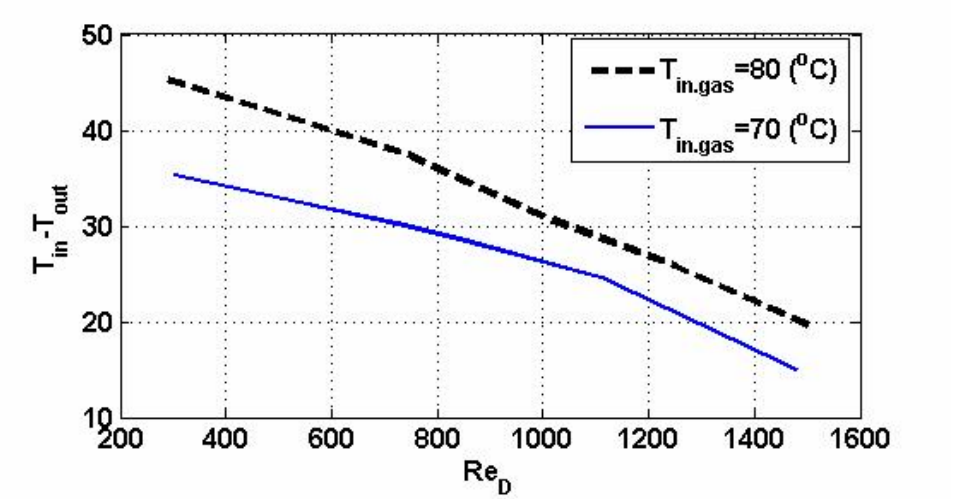
تاثیر پارامترهای جریان بر بازیافت حرارت

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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

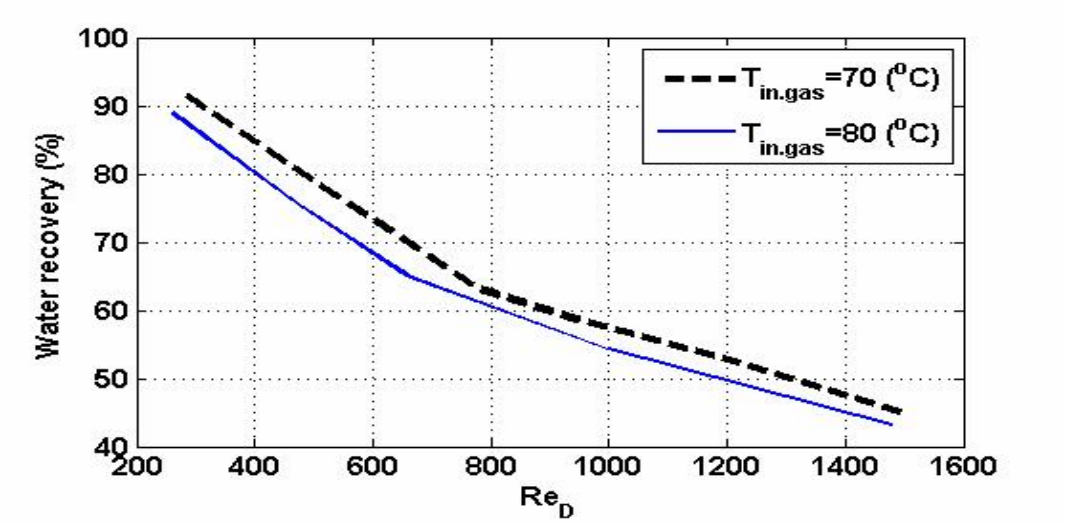


شکل٦) توزیع دما در طول مدول، دمای جریان سیال سرد ورودی (°C) ۳۰ و دمای گاز ورودی (°C)۸۰



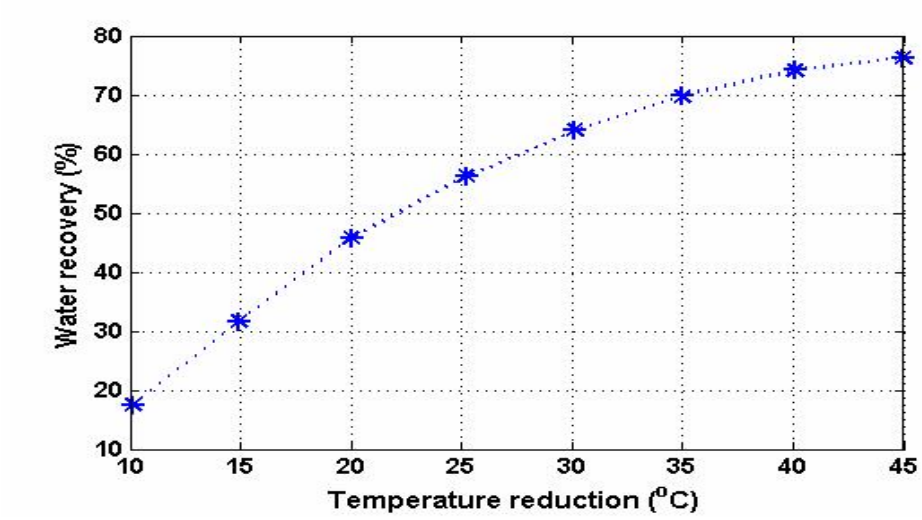
شکل ۷) نمودار تاثیر عدد رینولدز جریان گاز بر حسب تفاوت دمایی فاز گاز دودکش

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]



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.



شکل۹) نمودار درصد بازیافت آب برحسب کاهش دمای گاز دودکش (درصد آب ۱۱ ٪ ، دمای گاز دودکش ^{o}C ۸۰، دمای سیال سرد ^{o}C ۲۵)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

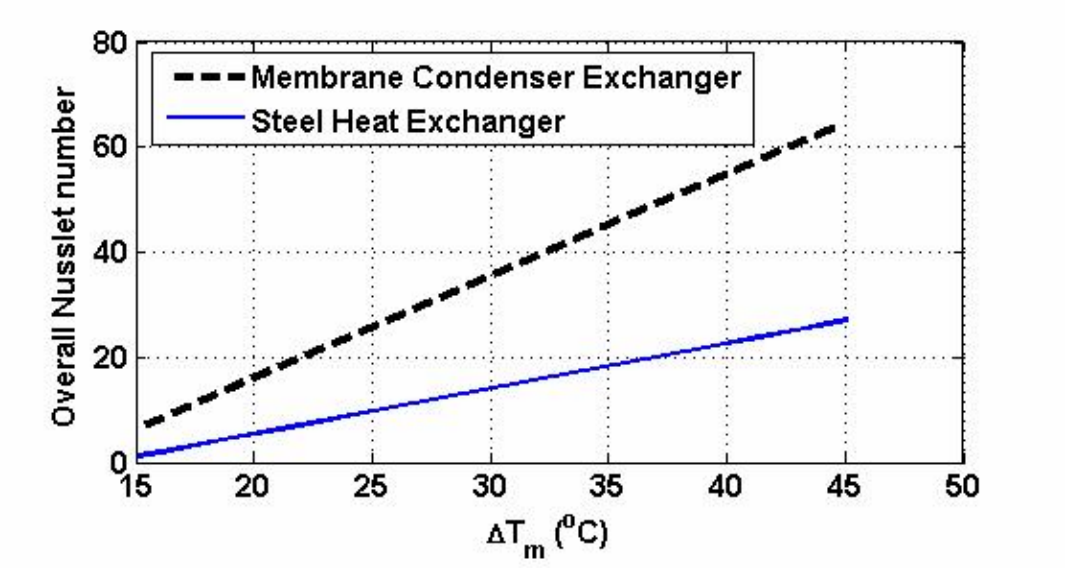
مقایسه انتقال حرارت موضعی مبدل چگالنده غشایی با مبدل حرارتی فولادی

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.

$$k_m = \frac{m_{cond}}{A} \quad (۱۹)$$

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.

ΔT_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 نفوذ ناپذیر برای غشا متخلخل حذف شده است.



شکل ۱۰) نمودار ضریب انتقال جرم بر حسب اختلاف دما در مبدل حرارتی و مبدل غشایی، Re =۲۸۰

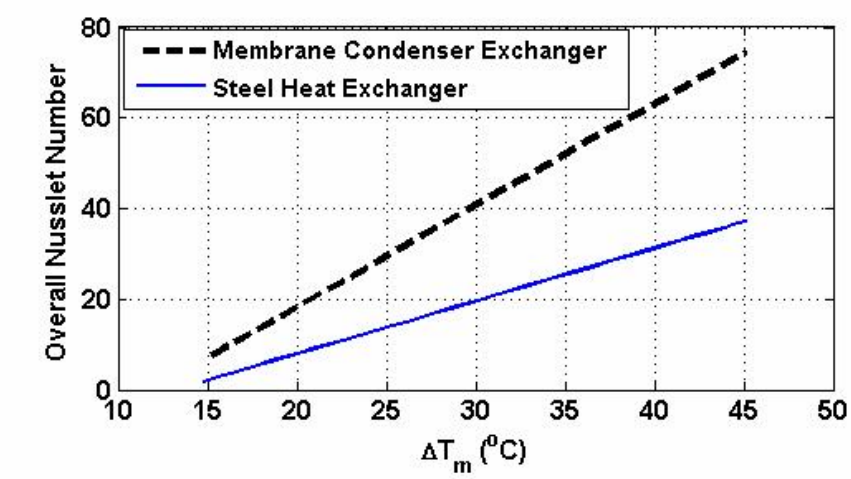
در شکل (۱۱) با مقایسه عدد ناسلت در مبدل غشایی با مبدل حرارتی فولادی ثابت شد که عدد ناسلت مبدل غشایی ٪۷۰ بزرگتر از مبدل حرارتی می‌باشد، زیرا در مبدل غشایی چگالش در حفره‌ها یا در سطح صورت می‌گیرد که از حفره‌ها

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

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.

$$Nu_{Membrane} = \frac{\text{¤}_s d}{n\text{®}d_o L\left[\Delta T_m \frac{\text{¤}_s + \text{¤}_L}{2n\text{®}^{\text{a}} L}\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)\frac{\text{¤}_s + \text{¤}_l}{nh_w n d_i L}\right]k} \qquad (۲۰)$$

که در این معادله Ø_1 و Ø_2 به ترتیب گرمای نهان و محسوس، h_w ضریب انتقال حرارت سمت جریان آب می‌باشد.



شکل۱۱) نمودار عدد ناسلت بر حسب اختلاف دما در مبدل حرارتی و مبدل غشایی، Re =۲۸۰

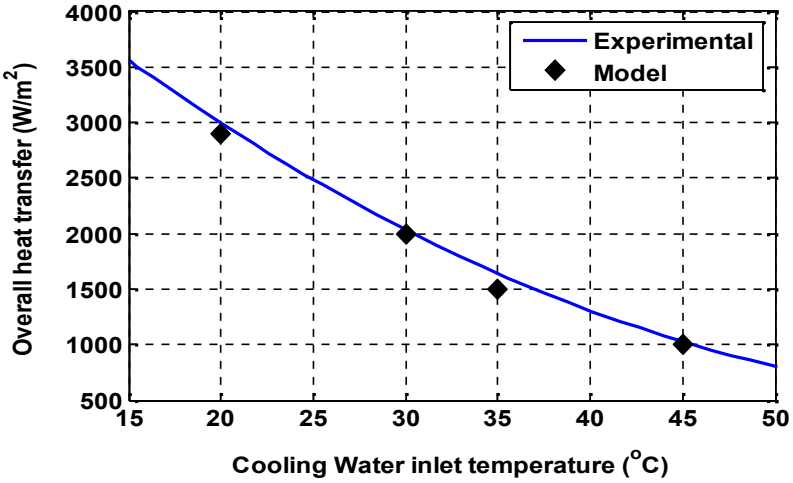
اعتبار سنجی

مدل پیشنهاد شده با استفاده از نتایج تجربی توسط وانگ[1] 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 موییننگی دارد، زیرا باعث افزایش ضریب چگالش موییننگی در

1) Wang et al.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

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 ^{o}C ۸۰ ، دبی گاز دودکش m^3/h ۶۰، کسر حجم H_2O در خوراک گاز ۱۱٪)

نتیجه گیری

در مقاله حاضر، مدل‌سازی جذب بخار آب و انرژی گرمایی هدررفت از صنایع گازی در مبدل غشایی با استفاده از آب به عنوان جاذب انجام شده است. در مدل‌سازی، حالت چگالش موییننگی 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 موییننگی 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 موییننگی 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

منابع

[1] Al-Marzouqi, M.H., El-Naas, M.H., Marzouk, S.A.M., Al-Zarooni, M.A., Abdullatif, N., Faiz, R., Modeling of CO2 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 Expositio,63530.

[3] Beerlage, M. A. M., Zeijsink, A. G. L, 2000, Preparation of water from flue gases, WO 0,056,426.

[4] Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoo, 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_2 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., Nymeijer, 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

[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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

فهرست علائم

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]