

شبیه‌سازی بازیافت آب و انرژی از گازهای اتلافی صنایع توسط تکنولوژی جدید مبدل چگالنده غشایی

موسی توانا^۱، سید نظام‌الدین اشرفی‌زاده^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

mousatavana@chemeng.iust.ac.ir

^۲ دانشیار مهندسی شیمی، آزمایشگاه فرایندهای پیشرفته جداسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

ashrafi@iust.ac.ir

چکیده: بسیاری از صنایع مقدار زیادی بخار آب را از طریق دودکش به اتمسفر تخلیه می‌کنند؛ این بخار آب می‌تواند منبع بالقوه‌ای برای تأمین انرژی و آب مورد نیاز صنایع باشد. در این مقاله، جداسازی بخار آب از گاز دودکش در یک مبدل چگالنده غشایی مورد مطالعه قرار گرفته و شبیه‌سازی فرایند با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی توسط نرم‌افزار کامسول صورت پذیرفته است. جدار لوله‌های غشایی از ماده خاص متخلخل طراحی شده که قادر به استخراج مایع چگالیده شده از گاز دودکش است. لوله‌های غشایی در طول مدتی که بخار آب از گاز دودکش خارج می‌شود، آن را از طریق مکانیزم چگالش موینگی جذب و بازیابی کرده و از گرمای محسوس و نهان هدررفته به‌طور مجدد استفاده می‌کنند. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از مراجع مقایسه شدند و مقادیر محاسبه‌شده مقدار انحراف متوسط ۶ درصد را با مقادیر آزمایشگاهی نشان دادند. نتایج همچنین نشان داد، چنانچه جریان گازهای هدررفت از صنایع حالت عادی داشته باشند (یعنی دمای بین ۶۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بین ۱۰ تا ۲۰ درصد) می‌توان با کاهش دمایی حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد، معادل ۲۰ درصد از آب هدر رفته و انرژی نهان بخار آب را بازیابی کرد.

واژه‌های کلیدی: مبدل چگالنده غشایی، چگالش موینگی، دینامیک سیالات محاسباتی، بخار آب، بازیافت انرژی.

۱. مقدمه

امریکا، تحقیق و توسعه برای کاهش میزان مصرف آب پاک و تازه توسط کارخانه‌های صنعتی را از طریق بازیابی آب اتلافی تبخیرشده، بنا نهادند. بازیابی آب از جو و به خصوص از گازهای خروجی که توسط بسیاری از فرایندهای صنعتی تولید می‌شود، می‌تواند منبع جدیدی برای آب آشامیدنی فراهم آورد. آب اتلافی تبخیرشده‌ای که معمولاً کارخانه‌ها را ترک کرده و نهایتاً وارد جو می‌شود، یک منبع آب بکر و تمام‌عیار است. تخمین زده شده که احتمالاً بازیابی تنها ۲۰ درصد از آب تبخیرشده کافی است تا کارخانه‌ها بتوانند خود آب مورد نیازشان را تأمین کنند. چنانچه صنعتی بتواند با گرفتن آب از بخار آن، چرخه آب را بسته و در نتیجه نیاز خود را به حداقل برساند، آب بیشتری می‌تواند برای سایر مصارف باقی بماند [۴ و ۵].

در حال حاضر، تکنولوژی تجاری‌سازی‌شده‌ای برای بازیابی آب از بخار آب اتلافی فرایندهای صنعتی وجود ندارد. به‌طور کلی، به شکل تئوریک این احتمال وجود دارد که بتوان 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 آمریکا طبق مجوز شماره ۲۰۰۶-۰۶NT42727.2,4 DE-FC26 انجام گرفته است. هدف پروژه مزبور توسعه مبدل‌های حرارتی چگالش، برای بازیابی آب از گازهای خروجی از نیروگاه‌های ذغال‌سنگی بود. دستگاه مبدل حرارتی چگالش توسعه یافت و با یک مجرای مستطیلی حاوی مبدل‌های حرارتی آب سرد که به شکل سیری قرار گرفته بودند، آزمایش شد. گازهای خروجی داغ از انتهای بویلر وارد دستگاه شده و حین عبور از مبدل حرارتی سرد می‌شوند. آب تولیدی می‌توانست برای فعالیت‌های کارخانه، مانند برج خنک‌کننده یا سولفورزدایی از گازهای خروجی مورد استفاده قرار گیرد [۱].

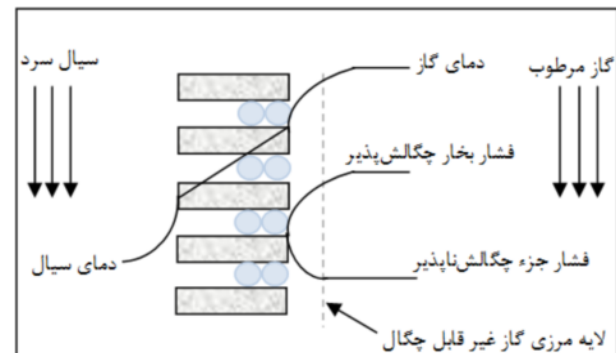
محققان دیگری پیشنهاد استفاده و به‌کارگیری از سیستم‌هایی بر پایه غشا برای بازیابی آب از گازهای هدررفته از صنایع را ارائه کرده‌اند. فناوری غشایی گزینه مناسبی از نظر کارایی انرژی برای جداسازی مولکولی است، زیرا غشا نه تنها کارایی انرژی بسیار بالا و قابلیت اطمینان زیادی دارد، بلکه فضای نسبتاً کوچکی را اشغال می‌کند. فرایندهای غشایی چنانچه به خوبی طراحی شده و در وضعیت عملیاتی مناسبی کار کنند، می‌توانند جداسازی بخار آب را از جریان‌های گازی انجام داده، آب پاک با خلوص بالا تولید کنند. این مزیت‌ها غشا را به یک گزینه جالب و امیدبخش برای جداسازی بخار آب از جریان‌های گازی حاصل از نیروگاه‌ها تبدیل می‌کند [۴]. بازیابی آب از جریان‌های اتلافی با رطوبت زیاد که دمای کمتری دارند، کارایی انرژی کاملاً بالایی دارد، زیرا آب در شرایط پراورزی (فاز بخار) قرار

در بیشتر مناطق جهان، آب پاک در دسترس در حال ناپدید شدن است، زیرا همچنان که تکنولوژی و جمعیت رشد می‌کند، مردم با سرعتی شگفت‌انگیز، منابع محدود آب پاک را آلوده کرده و هدر می‌دهند. امروزه به آب به چشم طلای آبی یا نفت قرن ۲۱ نگاه می‌کنند. اما برخلاف نفت، آب جایگزینی ندارد. کاربردهای آب شامل کشاورزی، صنعت، خانوار و فعالیت‌های زیست محیطی می‌شود. همه این کاربری‌ها به آب پاک نیاز دارند. کشاورزی در کل دنیا حدود ۷۰ درصد آب مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد که این میزان در کشورهای در حال توسعه، به ۹۰ درصد می‌رسد. این مصرف برای تولید غذا، الیاف طبیعی برای پوشاک، سوخت‌های زیستی و سایر کالاهای بر پایه مواد خام کشاورزی، ضروری است. آب مورد استفاده توسط خانوارها شامل ۸ درصد مصرف جهانی آب است. مصرف خانوار شامل آشامیدن، استحمام، پخت‌وپز، مصارف بهداشتی و باغبانی است. مصارف صنعتی آب ۲۲ درصد کل مصرف جهانی آب است. عمده مصرف‌کنندگان صنعتی آب شامل سدهای هیدروالکتریک، نیروگاه‌های برق، پالایشگاه‌های نفت و کارخانه‌های تولیدی هستند که نیازمند آب مصرفی با کیفیت بالایی می‌باشند [۱ و ۲].

پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که تا سال ۲۰۲۵ دوسوم مردم دنیا در مناطق کم آب زندگی خواهند کرد. افزایش نگرانی‌ها برای آب، خطرات کسب‌وکار قابل توجهی را بر هر شرکتی تحمیل می‌کند، به‌ویژه آن‌ها که در زنجیره تأمین خود، فرض را بر تحویل بی‌وقفه آب گذاشته‌اند. تحقیقی مشخص کرد که با وجود اینکه صنایع و شرکت‌های جهانی بر سر این مسئله توافق دارند که تأثیر کمبود آب شدید خواهد بود، تنها ۱۷ درصد آن‌ها برای چنین بحرانی آماده شده‌اند [۳]. بزرگ‌ترین مصرف آب منفرد در صنایع، در تولید برق اتفاق می‌افتد که به‌عنوان خوراک بویلر، آب خنک‌کننده و همچنین برای پاک‌سازی، به آب نیاز دارد. هر نیروگاه برق ذغال‌سنگی برای تولید هر کیلووات ساعت برق به ۱/۶ لیتر آب نیاز دارد، درحالی‌که یک نیروگاه اتمی به ازای هر کیلووات ساعت ۲/۳ لیتر آب نیاز دارد. یک نیروگاه حرارتی^۱ ۵۰۰ مگاواتی که یک بار در مسیر خنک‌سازی از آب استفاده می‌شود،^۴ ۴/۵ مترمکعب آب در هر ساعت، برای خنک کردن و دیگر فرایندها نیاز دارد. برای شرکت‌هایی که قصد توسعه نیروگاه‌های حرارتی جدید دارند، موضوع آب نخستین نگرانی است. در پاسخ به این نگرانی، هم اتحادیه اروپا و هم وزارت انرژی

به دلیل اختلاف چند هزار برابری چگالی آن‌ها رخ می‌دهد. هرچند تغییر دانسیته به شکل معکوس بر انتقال مایع اثر می‌گذارد، اما این مسئله از تأثیر مطلوب بر انتقال مایع بسیار کمتر است. معادله کلین ثابت می‌کند که تفکیک بخار آب در غشا در حالت چگالش موینگی می‌تواند هم عامل نرخ انتقال بالا و هم نرخ تفکیک بالا باشد [۷].

توزیع دما و فشار جزئی بخار در اطراف یک لوله غشایی متخلخل در شکل (۱) نشان داده شده است که با عمل نفوذ نادن^۳ و چگالش موینگی^۴ عمل جداسازی صورت می‌گیرد و سبب بازیافت آب از گازهای هدررفته می‌شود [۹].



شکل (۱): توزیع دما و فشار جزئی بخار در اطراف یک لوله غشایی متخلخل

۳. طراحی مبدل

مبدل غشایی طراحی شده در شکل (۲) نشان داده شده است. طول گام عرضی و طولی در مبدل غشایی، به ترتیب ۱۳/۶ و ۸/۸ میلی‌متر است. مبدل شامل ۷۸ لوله غشایی سرامیکی در ۱۲ ردیف است که قطر خارجی لوله‌ها ۵/۵ میلی‌متر و ضخامت لوله‌ها ۱ میلی‌متر و از جنس غشای سرامیکی ریزحفره است. برای شبیه‌سازی از حالت تقارن استفاده شده است و فقط نیمی از مبدل در نظر گرفته شده تا سرعت محاسبات بالا رود. حرکت جریان‌ها به صورت متقاطع می‌باشد، به طوری که جریان گاز داغ دودکش به صورت عمودی در خارج لوله‌ها و جریان آب سرد به صورت افقی در داخل لوله در جریان است. همان‌طور که بخار آب از دیواره غشای متخلخل به صورت مایع به جریان آب سرد در داخل لوله با مکانیزم چگالش انتقال می‌یابد، سیال داخل لوله را گرم‌تر می‌کند. آب، گرمای محسوس (به علت تفاوت درجه حرارت) و گرمای نهان ناشی از چگالش را جذب می‌کند. به این ترتیب، گاز دودکش سرد شده و از ورودی به خروجی دارای بخار

دارد و خود این انرژی نیز می‌تواند نهایتاً از آب مایع گرفته شده و از این طریق، کارایی کلی سیستم بالاتر رود. پدیده مذکور حاکی از ارزش اقتصادی بالقوه بازیابی آب و انرژی اتلافی است که سرمایه‌گذاری بر روی فناوری‌های جداسازی بخار آب به کمک غشا را توجیه‌پذیر می‌کند [۵ و ۶].

در این تحقیق، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر فرایند چگالش بخار آب، شبیه‌سازی مبدل حرارتی چگالنده غشایی با استفاده از نرم‌افزار کامسول^۱ توسعه یافت. تأثیر متغیرهای عملیاتی شامل دمای گاز خروجی، دمای آب سرد خروجی، نرخ چگالش و کسر مولی بخار آب مورد تحقیق واقع شد و عملکرد مبدل فولادی سستی با مبدل چگالنده غشایی مورد مقایسه قرار گرفت. کاربری این دو تکنولوژی در بازیافت بخار آب از گاز دودکش مورد بررسی قرار گرفت تا با بررسی ضرایب انتقال، کارایی این دو تکنولوژی در بازیافت آب و حرارت از گازهای اتلافی از صنایع مورد مقایسه قرار گیرد.

۲. تئوری

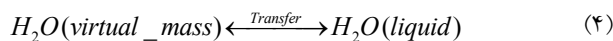
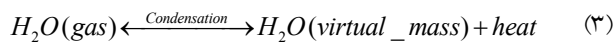
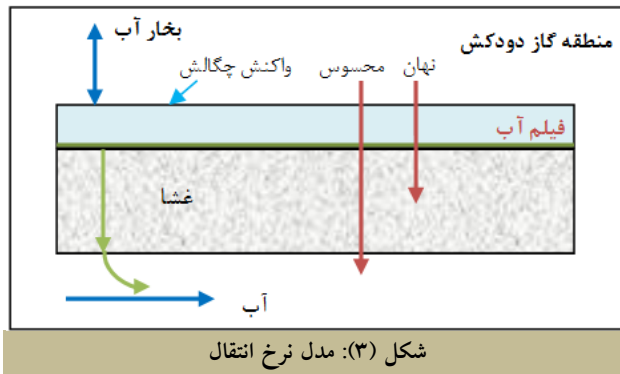
جداسازی بخار آب در مبدل فولادی به علت تأثیر دمای سیال سرد است که باعث ایجاد چگالش روی سطح مبدل می‌شود. در نتیجه، آب میعان‌یافته‌ای که نسبتاً کثیف و خورنده است، تولید می‌شود. اما چگالش در مبدل غشایی زمانی اتفاق می‌افتد که یکی از ترکیب‌های گاز قابل چگالش بوده و به دلیل کوچک بودن حفره‌ها در این حالت، چگالش موینگی می‌تواند رخ دهد. در این حالت، میعان ایجاد شده می‌تواند نفوذ فاز گازی از طریق حفره‌ها را متوقف کرده و تنها به فاز میعان‌یافته اجازه عبور دهد. معادله کلین^۲ پیش‌بینی می‌کند چنانچه فشار جزئی جزء تحت میعان، پایین‌تر از فشار بخار آن جزء باشد، امکان وقوع چگالش در حفره‌های ریز میسر است [۷-۸]. در بسیاری موارد، چگالش موینگی در ۵۰ تا ۸۰ درصد فشار بخار اشباع آغاز می‌شود، در نتیجه حفره‌ها می‌توانند به طور کامل، از آب میعان‌یافته پر شوند. شار دیگر اجزای ترکیب در گاز خروجی از خلال غشا بسیار 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 چنانچه 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 اغلب

3. Knudsen
4. Capillary Condensation

1. COMSOL
2. Kelvin

۴. مدل ریاضی

در این شبه‌سازی، از یک مدل چگالش برای محیط متخلخل غشا برای جداسازی استفاده شده است. مکانیزم چگالش به‌صورت یک واکنش دومرحله‌ای روی سطح خارجی و محیط متخلخل لوله‌های غشایی در نظر گرفته شده است. فیلم آب مجازی نشان داده شده در شکل (۳)، به‌صورت واکنش شیمیایی در محاسبات معرفی شده است.



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 (۵) مورد بررسی واقع شده است [۹]:

$$m_{Condensation} = \frac{(Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}) \times M \times 273.15}{T_g \times A} \quad (5)$$

در این رابطه، Q_{in} و Q_{out} نرخ جریان گاز در ورودی و خروجی، C_{in} و C_{out} غلظت حجمی بخار آب در فاز گاز در ورودی و خروجی، T_g درجه حرارت واقعی فاز گاز و A مساحت سطح غشا است [۱۱].

$$C_{out} = \frac{\int_{x=0, y=0}^{x=w, y=L} \int_{x=0, y=0}^{x=w, y=L} C(Z) dA}{\int_{x=0, y=0}^{x=w, y=L} \int_{x=0, y=0}^{x=w, y=L} dA} \Bigg|_{Z=H} \quad (6)$$

از طرفی، معادله انتقال اجزای مخلوط گاز دودکش در محیط متخلخل (غشا) به‌صورت معادله (۷) تعریف شده است:

$$\nabla \cdot \Gamma_i + u \cdot \nabla c_i = R_i + S_i \quad (7)$$

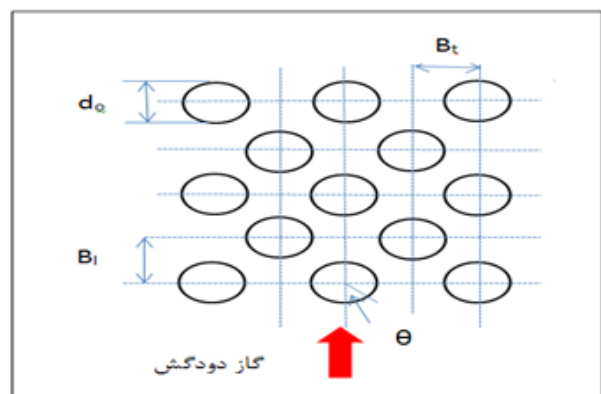
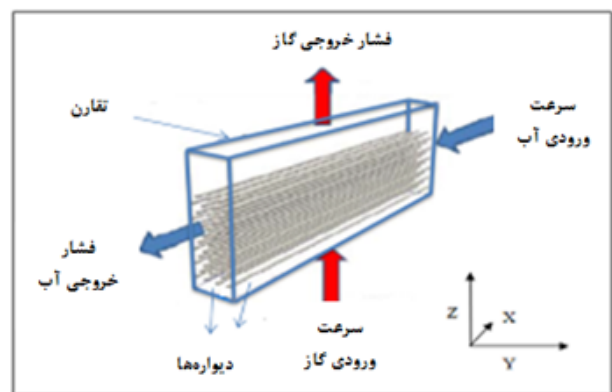
آب کمتری خواهد شد. به این ترتیب مبدل غشایی چگالنده، آب و گرمای زاید را بازیابی می‌کند. سیستم به سه بخش درون لوله غشا، غشا، و خارج لوله غشا (محل عبور گاز) تقسیم شده است.

در مبدل غشایی جریان متقاطع، گاز حاوی بخار آب در سمت پوسته عمود بر محور لوله (فیبر) که حلال در آن جریان دارد، حرکت می‌کند. با شروع عملیات جذب، گرادیان غلظت در طول فیبر کاهش پیدا می‌کند و زمانی که غلظت بخار آب در گاز زیاد باشد، گرادیان غلظت بیشتر کاهش می‌یابد و جریان حجمی گاز تغییر می‌یابد. موازنه جرم حول یک لوله غشایی برای محاسبه تغییرات غلظت و شدت جریان حجمی گاز به‌صورت معادلات (۱) و (۲) است [۱۰]:

$$Q_{Gm-1,n} C_{Gm-1,n} - Q_{m,n} C_{Gm,n} = \dots - Q_{Lm,n} (C_{Lm,n} - C_{Lm,n-1}) = A_{m,n} J_{m,n} \quad (1)$$

$$J_{m,n} = K_C (C_i - C_{m,R=out}) \quad (2)$$

که در این روابط $A_{m,m}$ مساحت انتقال جرم و $J_{m,m}$ شار انتقال جرم برای لوله (m,n) هستند.



شکل (۲): الف. مبدل غشایی طراحی شده و شرایط مرزی؛ ب. نحوه قرار گرفتن لوله‌های غشایی در مبدل

ضریب هدایت گرمایی است.

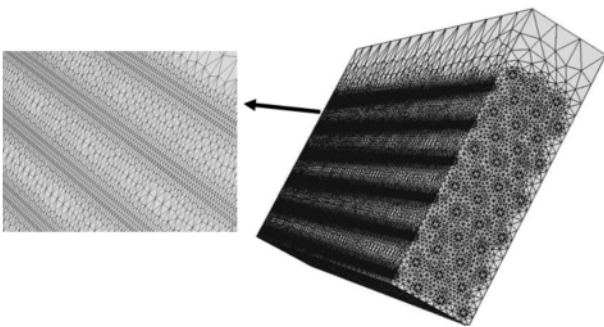
جدول (۲): شرایط مرزی دما برای غشا

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
$Y=0$	$\frac{\partial T_{Mem}}{\partial Y} = 0$	ایزوله
$Y=L$	$\frac{\partial T_{Mem}}{\partial Y} = 0$	ایزوله

۵. حل عددی

معادلات انتقال جرم و حرارت برای هر ۳ بخش تماس دهنده شامل لوله (فیبر)²، غشا و پوسته با شرایط مرزی ارائه شده توسط نرم افزار کامسول که از روش عددی المان محدود برای حل معادلات دیفرانسیل استفاده می کند، حل گردید [۱۴]. برای حل عددی معادلات، ابتدا باید دامنه مدل شبکه بندی گردد. نرم افزار، شبکه هایی به صورت سه ضلعی ایجاد می کند. شکل (۴) این شبکه بندی را نشان می دهد.

تعداد کل شبکه ها برابر ۵۱۷۳۰۳ است. در نقاطی که گرادیان غلظت بخار آب بیشتر است، تعداد شبکه ها کوچک تر است. برای تعیین شبکه های بهینه، نرم افزار کامسول از یک تابع تحت عنوان Adaptive Mesh Solver استفاده می کند. این تابع شبکه ها را به حداقل می رساند و در نقاطی از دامنه که گرادیان غلظت بالاست، از یک ضریب برای کاهش یکنواخت اندازه شبکه ها استفاده می کند. این تابع برای مسائل ساکن و پیچیده غیرخطی یا مقادیر ویژه مناسب است. مجموعه معادلات غیرخطی به دست آمده به مدل خطی تبدیل شده و سپس این مدل خطی با استفاده از حل کننده UMFPACK که از روش حذفی گاوس استفاده می کند، حل شد [۱۵-۱۶].



شکل (۴): نمایی از مش بندی ایجاد شده

عبارت سمت چپ به صورت جمله شار ناشی از نفوذ و تانسور پراکندگی^۱ است که به صورت رابطه (۸) به دست آمده است [۱۰]:

$$N_i = \Gamma_i + uc_i = -(D_{Di} + D_{e,i})\nabla c_i + uc_i \quad (8)$$

در این روابط، C_i غلظت مولی اجزاء، S_i نرخ اضافه شده (در این بررسی $S_i=0$)، و R_i نرخ خالص تولید به وسیله واکنش شیمیایی است. در این محاسبات، فرض $Y_w=1$ حاکم است. با فرضیات حاکم، معادله به صورت رابطه (۹) به دست آمده و توسط شرایط مرزی مندرج در جدول (۱) تحلیل شده است [۱۲].

$$D_{wt-Mem} \left[\frac{\partial^2 C_{wt-Mem}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{wt-Mem}}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_{wt-Mem}}{\partial Y^2} \right] + R_i = 0 \quad (9)$$

جدول (۱): شرایط مرزی غلظت برای غشا

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

نرخ واکنش شیمیایی اجزاء (چگالش بخار آب) به صورت رابطه (۱۰) تعریف شده است [۹]:

$$R_{wt} = K_1 \frac{P_{vapor} - P_{sat}}{R.M \left(\frac{T_{cold} + T_{vapor}}{2} \right)} \quad (10)$$

در این رابطه، P_{vapor} فشار بخار آب، P_{sat} فشار اشباع، T_{col} 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 توسط رابطه (۱۱) به دست آمده است [۹]:

$$K_1 = 0.38 \frac{T_{cold}}{T_{vapor}} \quad (11)$$

معادله انتقال گرما در محیط متخلخل به صورت رابطه (۱۲) تعریف شده [۱۳] و در شرایط مرزی دمایی مندرج در جدول (۲) حل شده است.

$$\rho c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda_{eq} \nabla T) + Q \quad (12)$$

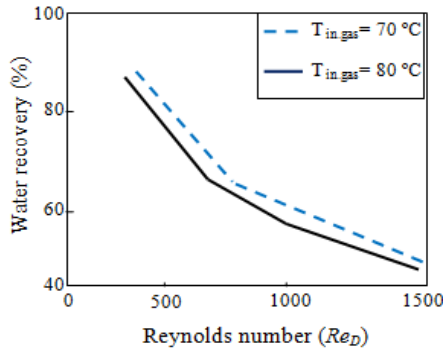
$$\lambda_{eq} = \varepsilon_p \lambda_p + (1 - \varepsilon_p) \lambda \quad (13)$$

در این رابطه، ε_p کسر حجمی فضای خالی ماده متخلخل و λ

۶. نتایج و بحث

۱.۶. توزیع غلظت در مبدل چگالنده‌ی غشایی

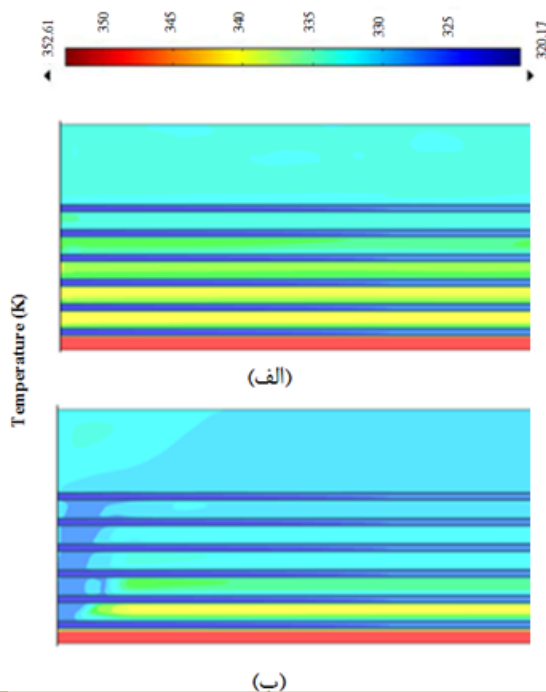
توزیع غلظت در مبدل غشایی، محاسبه شده توسط دینامیک سیالات محاسباتی، در شکل (۵) نشان داده شده است. کسر مولی بخار آب ورودی در گاز دودکش از ۰/۱۱ درصد به ۰/۰۱ درصد کاهش یافته است. در این مبدل غشایی U آب از سمت راست وارد مبدل می‌شود و جریان گاز به صورت متقاطع از پایین در جریان است. در محدوده بررسی شده، به علت اختلاف درجه حرارت بین گاز دودکش و آب خنک‌کننده، فرایند چگالش غالب بر انتقال جرم جابجایی است. این امر موجب می‌شود که کسر مولی بخار موجود در گاز دودکش، در رینولدزهای پایین‌تر در مقطع بالای مبدل غشایی کاهش بیشتری یابد (۵-الف). در شکل (۶) تأثیر عدد رینولدز بر بازیافت جرمی بخار آب نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز، به دلیل کاهش مدت اقامت گاز دودکش در مبدل غشایی، بازیافت بخار آب کاهش یافته است.



شکل (۶): نمودار تأثیر عدد رینولدز بر بازیافت جرمی بخار آب، در دو دمای مختلف گاز دودکش

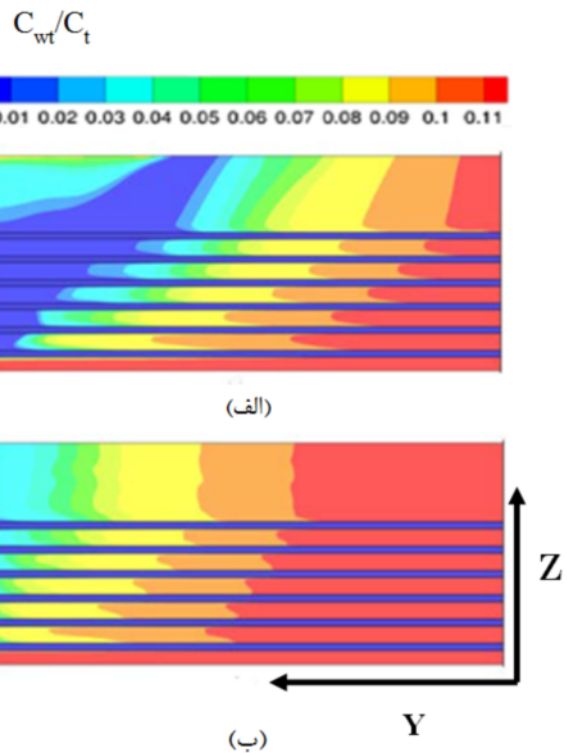
۲.۶. توزیع دما در مبدل چگالنده غشایی

توزیع دما در مبدل غشایی محاسبه شده توسط دینامیک سیالات محاسباتی در شکل (۷) نشان داده شده است. جهت جریان آب از راست به چپ و جهت جریان گاز از پایین به بالا به صورت متقاطع است. با توجه به انتقال گرما بین دو جریان مذکور، گاز دودکش توسط آب سرد شده و حرارت زاید بازیافت می‌شود. تأثیر عدد رینولدز بر اختلاف دمای ورودی و خروجی گاز دودکش در شکل (۸) نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز، اختلاف دما کاهش می‌یابد، به طوری که کاهش بازیافت حرارتی را در پی دارد.



شکل (۷): نمودار توزیع دما در مبدل غشایی

(دبی جریان سیال سرد $4\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ، دمای گاز دودکش ورودی $80\text{ }^\circ\text{C}$ ، دمای سیال سرد ورودی $25\text{ }^\circ\text{C}$ ، دبی گاز دودکش $20\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ، دمای شبنم $60\text{ }^\circ\text{C}$ الف. عدد رینولدز 400 ؛ ب. عدد رینولدز 800)



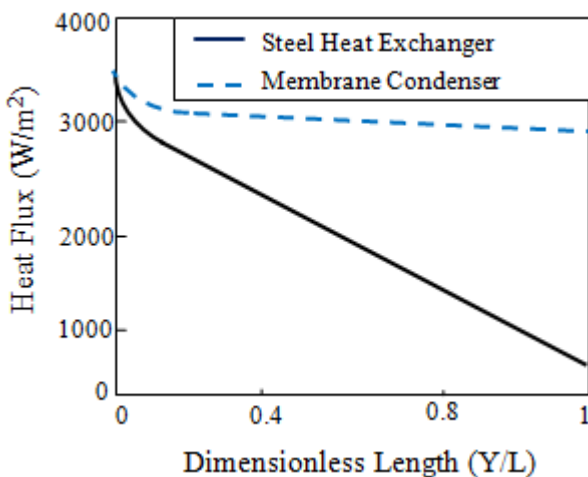
شکل (۵): نمودار توزیع غلظت بی‌بعد بخار آب (C_{wt}/C_{tot}) در طول و ارتفاع مبدل غشایی (دبی جریان سیال سرد $1/2\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ، دمای سیال سرد ورودی $25\text{ }^\circ\text{C}$ ، دمای گاز دودکش ورودی $80\text{ }^\circ\text{C}$ ، دبی گاز دودکش $20\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ الف. عدد رینولدز 400 ؛ ب. عدد رینولدز 800)

۳.۶. مقایسه انتقال حرارت موضعی در مبدل‌های غشایی و فولادی سنتی

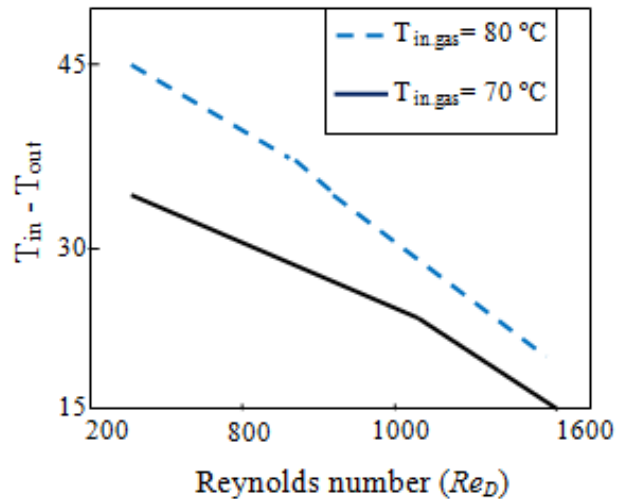
فولادی سنتی

انتقال حرارت موضعی در طول تماس‌دهنده غشایی توسط رابطه (۱۴) تحلیل شده است. همان‌طور که از رابطه مشخص است، میزان تغییرات انتقال حرارت در طول تماس‌دهنده غشایی، به‌صورت خطی ملایم کاهش می‌یابد. دلیل این امر میزان ناچیز تغییرات جرم چگالیده در امتداد طول غشا می‌باشد. چنان‌که در شکل (۱۰) مشخص است، تفاوت در میزان انتقال حرارت موضعی در طول لوله‌های غشایی چندان زیاد نیست. پدیده مذکور به دلیل عدم انباشتگی مایع در سطح لوله‌های غشایی است. مقایسه عملکرد مبدل غشایی با مبدل حرارتی فولادی سنتی نشان داد که میزان تبادل حرارتی در مدول غشایی، شرایط ایدئال‌تری دارد. تغییرات شار انتقال حرارت برای هر دو نوع مبدل‌های سنتی و غشایی در دو بعد، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، در مبدل غشایی، شار انتقال حرارت موضعی (به‌دلیل بقای اختلاف دمای گاز دودکش و سیال لوله) افزایش یافته است [۱۴].

$$q = \frac{(m_{cond} + m_c) C_p}{\pi d} \frac{dT_c}{dl}(y) \quad (14)$$

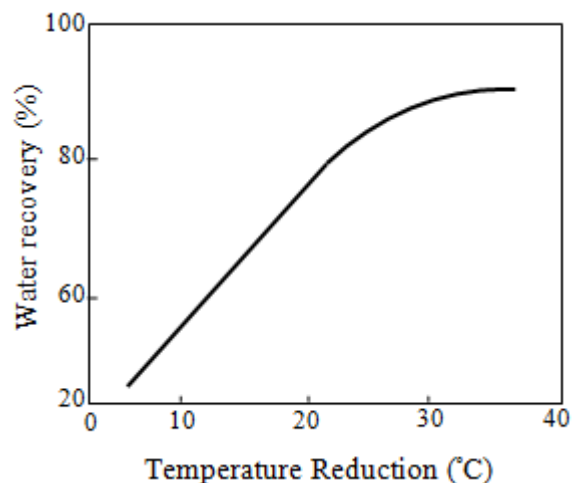


شکل (۱۰): نمودار تأثیر طول تماس‌دهنده بر بازیافت حرارت در مقطع $Z=H/3$ (دبی جریان سیال سرد $4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ، دمای گاز دودکش ورودی 80°C ، دمای سیال سرد ورودی 20°C ، دبی گاز دودکش $60 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ، دمای شبنم 60°C) (۶۰)

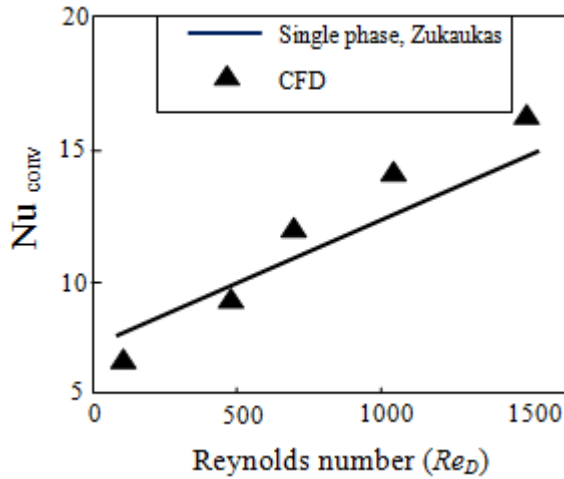


شکل (۸): نمودار تأثیر عدد رینولدز جریان گاز بر حسب تفاوت دمایی فاز گاز

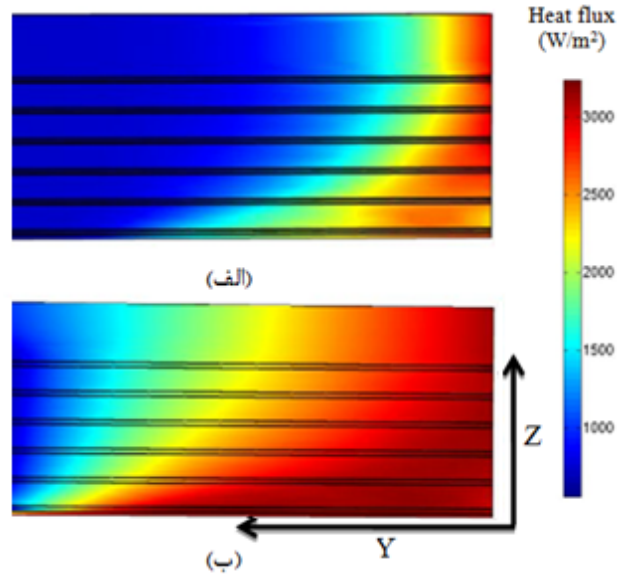
تأثیر دمای گاز دودکش بر مقدار بازیافت آب در شکل (۹) نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، کاهش بیشتر دمای ورودی گاز دودکش سبب افزایش مقدار بازیافت آب می‌شود. در واقع، کاهش هرچه بیشتر دمای ورودی تا 40°C باعث افزایش بیشتر بازیافت آب شده است. با توجه به شبیه‌سازی انجام‌شده، برای بازیافت حدود ۲۰ درصد از آب هدر رفت در صنعت نیاز به کاهش دمایی حدود 10°C درجه سانتی‌گراد است.



شکل (۹): نمودار درصد بازیافت آب بر حسب کاهش دمای گاز دودکش (درصد آب ۱۱٪، دمای گاز دودکش 80°C ، دمای سیال سرد 25°C)



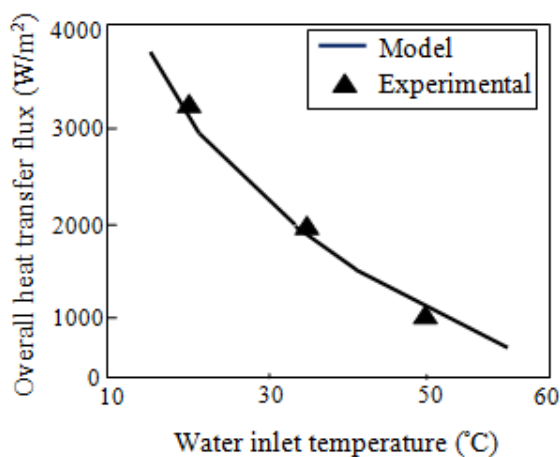
شکل (۱۲): نمودار بررسی عدد ناسلت جابه‌جایی اجباری برحسب رینولدز در محدوده جریان آرام



شکل (۱۱): تأثیر طول و ارتفاع تماس دهنده بر بازیافت حرارت (دبی جریان سیال سرد $4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ، دمای گاز دودکش ورودی 80°C ، دبی گاز دودکش $20 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ، دمای شبنم 60°C)
الف. مبدل حرارتی فولادی؛ ب. مبدل غشایی

۴.۶. اعتبار سنجی

نتایج مدل ارائه‌شده در این تحقیق با نتایج تجربی ارائه‌شده توسط وانگ و همکاران مقایسه گردید تا صحت مدل اثبات شود [۴]. مقایسه داده‌های مدل با داده‌های تجربی که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، توافق خوبی را نشان می‌دهد. تأثیر دمای سیال سرد بر بازیافت حرارت نشان می‌دهد که با کاهش دمای سیال سرد، بازیافت حرارت افزایش می‌یابد. در واقع، کاهش دمای فاز مایع تأثیر مستقیم در ضریب نفوذ موینگی دارد. کاهش مزبور باعث افزایش ضریب چگالش موینگی در حفره‌های غشا گردیده و در نتیجه، نرخ چگالش بخار آب در حفره‌های غشا افزایش می‌یابد.



شکل (۱۳): نمودار تأثیر دمای سیال سرد بر شار انتقال حرارت کلی (دمای گاز دودکش ورودی 80°C ، دبی گاز دودکش $60 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ، نسبت حجمی H_2O در خوراک گاز ۱۱٪)

مقایسه بین عدد ناسلت^۱ جابه‌جایی اجباری ارائه‌شده توسط زوکائوکاس^۲ (رابطه ۱۵) در دسته لوله‌ها با نتایج شبه‌سازی در محدوده جریان آرام در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مقایسه انجام‌شده نشان می‌دهد مدل ارائه‌شده توسط شبه‌سازی از دقت خوبی برخوردار است.

$$Nu = C Re_{d,\max}^n Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{1/4} \quad (15)$$

$$0.7 < Pr < 500, 10 < Re_{Re,\max} < 10^6$$

ثابت $n=0.4$ و C برای تعداد ردیف لوله کمتر از ۲۰ با توجه به

تصحیح برابر 0.98 است [۱۵].

1. Nusselt number
2. Zukauskas

۷. نتیجه گیری

تقدیر و تشکر

از شورای پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران به خاطر حمایت مالی این پروژه کمال تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

در تحقیق حاضر، مدل‌سازی جذب بخار آب در مبدل غشایی جریان متقاطع با استفاده از آب به عنوان جاذب انجام شد. در مدل‌سازی، حالت چگالش مویینگی در حفره‌های غشا در نظر گرفته شده است. روند تغییرات غلظت و دما در مبدل غشایی مورد بررسی قرار گرفت.

فهرست علائم

نماد	واحد	کمیت
A	m^2	مساحت سطح
C	$mol \cdot m^{-3}$	غلظت
D	$m \cdot s^{-2}$	ضریب نفوذ
d	m	قطر
H	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	ضریب انتقال حرارت
K	$m \cdot s^{-1}$	ضریب انتقال جرم
J_i	$mol \cdot m^2 \cdot s^{-1}$	شار جزء i
M	$kg \cdot mol^{-1}$	وزن مولکولی
P	Pa	فشار
Q	$m^3 \cdot s^{-1}$	شدت حجمی
R	$Pa \cdot m^3 \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}$	ثابت جهانی گازها
r	m	شعاع
T	$^{\circ}C$	دما
V	$m \cdot s^{-1}$	سرعت

▪ سرعت بالای گاز دودکش (محدوده بالای رینولدز عملیاتی) باعث کاهش میزان حرارت و جرم بازیافت می‌شود، زیرا زمان اقامت در مبدل غشایی کاهش می‌یابد. در مقابل، سرعت بالای جریان سیال سرد یک پارامتر مثبت به شمار می‌آید، زیرا در طی فرایندهای صنعتی، حرارت بازیافت شده از گاز دودکش توسط سیال سرد به صورت پیوسته به واحدهای گرم‌کن داده شده و سیال سرد می‌شود.

▪ بالا بودن دمای گاز دودکش هرچند از جهتی تأثیر مثبت روی بازیافت حرارت دارد، اما از آن جهت که بر روی نرخ چگالش مویینگی تأثیر منفی (کاهش تراوش غشا) می‌گذارد، پارامتری منفی در نرخ بازیافت جرم محسوب می‌شود. کاهش دمای سیال سرد ورودی سبب افزایش بازیافت بخار آب و حرارت می‌گردد.

حروف یونانی

ϵ_m	--	ضریب تخلخل
δ	m	ضخامت
η	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$	ویسکوزیته
λ	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	ضریب هدایت گرمایی
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	چگالی

▪ در مبدل غشایی، به دلیل کوچک بودن حفره‌ها، چگالش مویینگی رخ می‌دهد. در این حالت، میعان ایجاد شده می‌تواند نفوذ فاز گازی از طریق حفره‌ها را متوقف کرده و تنها به فاز میعان یافته اجازه عبور دهد. در بسیاری موارد، چگالش مویینگی در ۵۰ تا ۸۰ درصد فشار بخار اشباع آغاز می‌شود، در نتیجه حفره‌ها می‌توانند به طور کامل از آب میعان یافته پر شوند.

▪ با مقایسه میزان حرارت بازیافت شده در مدول غشایی با همین مقدار، در مبدل حرارتی فولادی ثابت شد که میزان حرارت بازیافتی مدول غشایی ۶۰ تا ۷۰٪ بیشتر است. پدیده مذکور به دلیل وقوع چگالش در حفره‌ها یا در سطح مدول غشایی است که چگالیده از حفره‌ها عبور می‌کند و نسبت به مدول فولادی دارای تجمع روی سطح نیستند.

بالانویس‌ها

Cold	سیال سرد
FG	گاز دودکش
In	داخل
L	مایع
Sat	اشباع
Mem	غشا
Wt	آب
Out	بیرونی

- [1] *Waste Heat Recovery – Technology and Opportunities in US Industry*, BCS, Inc., DOE ITP Program, Project Final Report, 2008.
- [2] Feeley, T., Pletche, J., Carney, B., McNemar, A.T., Department of Energy/National Energy Technology Laboratory's Power Plant-Water R&D Program, Power-Gen International, 2006.
- [3] Rabovitser, I., Knight, R., Remick, R., *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, 2003.
- [4] Bao, A., Wang, D., Lin, C.X., *Nanoporous Membrane Tube Condensing Heat Transfer Enhancement Study*, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, paper No. 63530, 2011.
- [5] Judd, S., Jefferson, B., *Membrane for Industrial Wastewater Recovery and Re-use*; Elsevier Science Ltd: Oxford, UK, 2003.
- [6] Jeong, K., *Condensation of Water and Sulfuric Acid Vapor in Boiler Flue Gas*, Ph.D. Dissertation, Lehigh University, AAT 3354749, 2009.
- [7] Scovazzo, P., Hoehn, A., Todd, P., *Membrane Porosity and Hydrophilic Membrane-Based Dehumidification Performance*, Journal of Membrane Science, Vol. 167, 217–225, 2000.
- [8] Hiemenz, Paul C., Rajagopalan, R., *Principles of Colloid and Surface Chemistry*, 3rd ed., Marcel Dekker Inc., 1997.
- [9] Macedonio, F., Brunetti, A., Barbieri, G., Drioli, E., *Membrane Condenser as a New Technology for Water Recovery from Humidified "Waste" Gaseous Streams*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, Vol. 52, No. 3, 1160–1167, 2013.
- [10] Dindore, V.Y., Brilman, D.W.F., Versteeg, G.F., *Modelling of Cross-Flow Membrane Contactors: Physical Mass Transfer Processes*, Journal of Membrane Science, Vol. 251, 209–222, 2005.
- [11] Shirazian, S., Ashrafizadeh, S.N., *3D Modeling and Simulation of Mass Transfer in Vapor Transport through Porous Membranes*, Chemical Engineering & Technology, Vol. 36, 177–185, 2013.
- [12] Bird, R.B., Stewart, W., Lightfoot, E.N., *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, New York, 1960.
- [13] Drioli, E., Criscuoli, A., Curcio E., *Membrane Contactors: Fundamentals, Applications, and Potentialities*, Elsevier, Amsterdam, 2006.
- [14] Yu, H., Yang, X., Wang, R., Fane, A.G., *Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in Direct Membrane Distillation in a Hollow Fiber Module with Laminar Flow*, Journal of Membrane Science, Vol. 384, 107–116, 2011.
- [15] Zukauskas, A., *Heat Transfer from Tubes in Cross Flow*, Advanced Heat Transfer, Vol. 8, 93–160, 1972.
- [16] Shirazian, S., Ashrafizadeh, S.N., *Near-Critical Extraction of the Fermentation Products by Membrane Contactors: A Mass Transfer Simulation*, Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 50, 2245–2253, 2011.