

شبیه سازی اثر لایه متخلخل روی فیلم ریزان بر پارامترهای انتقال حرارت و انتقال جرم با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

سمانه امینی آخور^۱، کاظم اداوی^۲، یاسن مهدی زاده چله بری^۲، ماجد امینی^۲، احمد رضانی سعادت آبادی^۲

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

^۲ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

نام نویسنده مسئول:

کاظم اداوی

چکیده

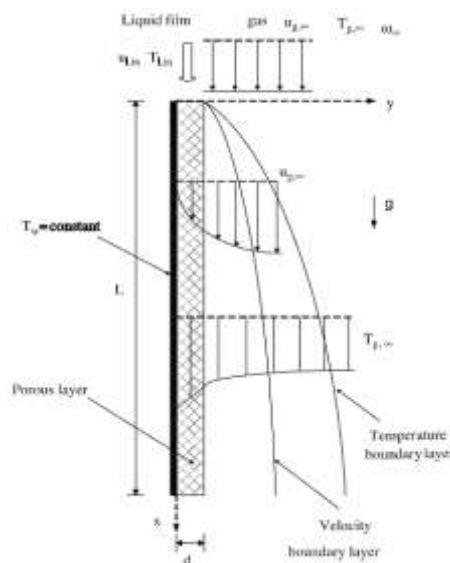
هدف از این پژوهش ارزیابی و مدل سازی انتقال جرم و انتقال حرارت در تبخیر فیلم مایع توسط جریان هوای مرطوب در حضور یک لایه متخلخل به عنوان بهبود دهنده بر روی صفحه، به روش المان محدود با استفاده از نرم افزار شبیه سازی چندمنظوره کامسول می باشد. به همین منظور جریان مایع و گاز توسط دو لایه مرزی آرام با حالت غیر داری بصورت همسو در مجاورت هم قرار گرفته اند. اثر پارامترهای مختلف نظیر تخلخل، ضخامت لایه متخلخل، رطوبت نسبی محیط و عدد لوئیس بر روی میانگین عملکرد انتقال حرارت و جرم مورد بررسی قرار گرفته است. پس از انجام مدل سازی با استفاده از نرم افزار، ارزیابی نتایج حاصل حاکی از آن بود که قرار دادن لایه ای متخلخل بر روی صفحه نرخ تبادل حرارت و جرم را بین دو فاز را بهبود می بخشد. علاوه بر این حضور لایه متخلخل تحت شرایط میزان تخلخل پایین، ضخامت لایه متخلخل کمتر و نیز سرعت های بالاتر جریان های عملیاتی، مؤثر تر بوده و راندمان بالاتری را فراهم می کند. همچنین تحت ضخامت های کمتر و میزان تخلخل پایین تر، اعداد بدون بعد ناسلت، شروود و لوئیس مقادیر بزرگتری را اختیار می کنند. لازم به ذکر است که تحت شرایط مشابه همواره تاثیر افزایش میزان تخلخل بر روی عملکرد انتقال حرارت و انتقال جرم نسبت به افزایش ضخامت لایه متخلخل، بیشتر بوده است. با افزایش سرعت جریان هوا عدد ناسلت و شروود افزایش یافته است. و با افزایش رطوبت هوای ورودی مقدار اعداد بدون بعد ناسلت و شروود افزایش داشته است.

واژگان کلیدی: نرم افزار چند منظوره کامسول، المان محدود، مدل سازی، فیلم ریزان، محیط متخلخل.

مقدمه

ساختار فرآیندی تبخیر فیلم مایع به شرایطی برمی گردد که در آن بدلیل وجود اختلاف دما قابل ملاحظه بین دو سیال گاز و مایع مجاور، در فصل مشترک دو سیال ممکن است تغییر فاز مشاهده گردد. تحت شرایطی که جریان گازی به عنوان یک منبع حرارتی گرم عمل کند و فیلم مایع مجاور آن در شرایط اشباع باشد، بواسطه اختلاف دمای کافی بین جریان گاز داغ و مایع اشباع، انتقال حرارت بین آن دو منجر به انتقال بخشی از مایع به درون فاز بخار می گردد. بدنبال آن بخار حاصل در محیط پیرامون فیلم مایع توسط نیروی بایونسی (جابجایی آزاد) یا بوسیله ترکیبی از نیروهای بایونسی و جریان های جابجایی اجباری به نقاط دیگری حمل می گردد. این فرآیند پیوسته تکرار می گردد که طی آن همواره نرخ تبخیر معینی به ازای شرایط عملیاتی موجود حاصل می گردد.

به دست آوردن نرخ انتقال حرارت و انتقال جرم در جریان روی صفحه متخلخل موضوعی است که در گذشته مورد توجه بوده و بیشتر کارهای آزمایشگاهی روی این زمینه انجام شده [1-6]، ولی کارهای مدل سازی کمتری با استفاده از روش المان محدود انجام شده است. در پژوهش حاضر سعی بر آن می شود که با استفاده از نرم افزار شبیه سازی کامسول درک کاملی از پدیده فوق بدست آید. همچنین چگونگی تغییرات و تاثیر همزمان متغیرهایی نظیر تخلخل، ضخامت لایه متخلخل، رطوبت نسبی محیط و عدد لوئیس بر روی نرخ انتقال حرارت و انتقال جرم ارائه می گردد. در این مطالعه از آنجایی که آنالیز تئوری مسئله تبخیر فیلم مایع به علت درگیر بودن همزمان پدیده های انتقال جرم و انتقال حرارت در لایه متخلخل اشباع بسیار پیچیده می باشد، فرض شده است که لایه های مرزی جریان های هوا و مایع در شرایط غیر داری در مجاورت هم قرار گرفته اند.



شکل ۱: انرژی پیوند حالت سالیتون N -ذره ای بر حسب ϕ/π برای سه مقدار مختلف N [۴].

لئو و همکاران [۶]، انتقال حرارت و انتقال جرم در تبخیر فیلم مایع بر روی یک صفحه عمودی تحت محیط متخلخل غیر داری را مورد ارزیابی قرار دادند. در این مساله اثر پارامترهایی نظیر میزان تخلخل، رینولدز فیلم مایع ورودی (Re_{li}) و رینولدز جریان هوای ورودی (Re_{ai}) بر روی نرخ انتقال جرم و نرخ انتقال حرارت بررسی شد. نتایج حاکی از آن بود که عملکرد انتقال حرارت و انتقال جرم

تحت Re_{ai} بالاتر، Re_{li} پایین تر و میزان تخلخل بالا مطلوب تر می باشد. به طوری که بالاترین میزان حساسیت آن نسبت به پارامتر رینولدز فیلم مایع ورودی می باشد.

لی و کروگلو [۱۲]، به بررسی تجربی اثر یک میکرو لایه متخلخل درون یک لوله افقی (مبدل حرارتی) پرداختند. و این نتیجه بدست آمد که با وجود لایه متخلخل مقدار انتقال حرارت در رینولزهای بالای جریان سیال سرد افزایش داشته است.

فرضیات و معادلات حاکم

همانطوریکه در شکل ۱-۱ بصورت شماتیک ارائه شده است، این مدل روی یک صفحه عمودی با دمای دیواره (T_w) مطالعه می شود. لایه متخلخل نازک با ضخامت (d) روی صفحه را پوشانده است. صفحه توسط مایع ریزان با دمای ورودی (T_{l-in}) و دبی جریان ورودی (m_{l-in}) مرطوب می شود. فیلم مایع در معرض جریان گاز هم جهت با سرعت ($u_{g\infty}$) و دمای محیط ($T_{g\infty}$) و غلظت جرمی (w_{∞}) قرار می گیرد. گرما از صفحه به طرف فیلم مایع و نهایتاً جریان گاز منتقل می گردد. جریان گاز آرام، پایا و شبه لایه مرزی معمولی فرض می شود. محیط متخلخل اشباع، ایزوتروپیک و همگن و فرض تعادل حرارتی محلی در این حالت برقرار است. علاوه بر این ما فرض می کنیم که سطح تماس گاز-مایع ثابت و روی سطح لایه متخلخل قرار دارد. براساس فرض فیلم نازک مایع، تجزیه و تحلیل درجه بزرگی نشان می دهد که جملات ایستایی در معادلات مومنتم در مقابل جملات نفوذ قابل اغماض هستند. علاوه بر این گرادیان حرارت و سرعت در جهت طول نسبت به جهت عرض (جهت انتقال) خیلی کمتر است. با در نظر گرفتن مدل غیرداریسی از لایه مرزی ویسکوز و اثرات فیزیکی، معادلات مومنتم وانرژی و انتقال جرم بصورت ذیل خلاصه می شوند:

فرم کلی معادله پیوستگی مطابق با رابطه (۱-۲) می باشد. معادله پیوستگی فاز گاز بصورت دو بعدی با فرمول (۲-۲) بیان می گردد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial u_g}{\partial x} + \frac{\partial v_g}{\partial y} = 0 \quad (2-2)$$

معادله حرکت جریان گاز در جهت محور x بصورت ذیل ارائه می گردد:

$$u_g \frac{\partial u_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial u_g}{\partial y} = \nu_g \frac{\partial^2 u_g}{\partial y^2} \quad (2-3)$$

معادله انرژی جران گاز بصورت ذیل خلاصه می شود:

$$v_g \frac{\partial T_g}{\partial y} = \alpha_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial y^2} \quad (2-4)$$

معادله کلی انتقال جرم بصورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + v \cdot \nabla w = D \cdot \nabla^2 w + R \quad (2-5)$$

که در آن R منبع تولید یا مصرف جرمی می باشد.

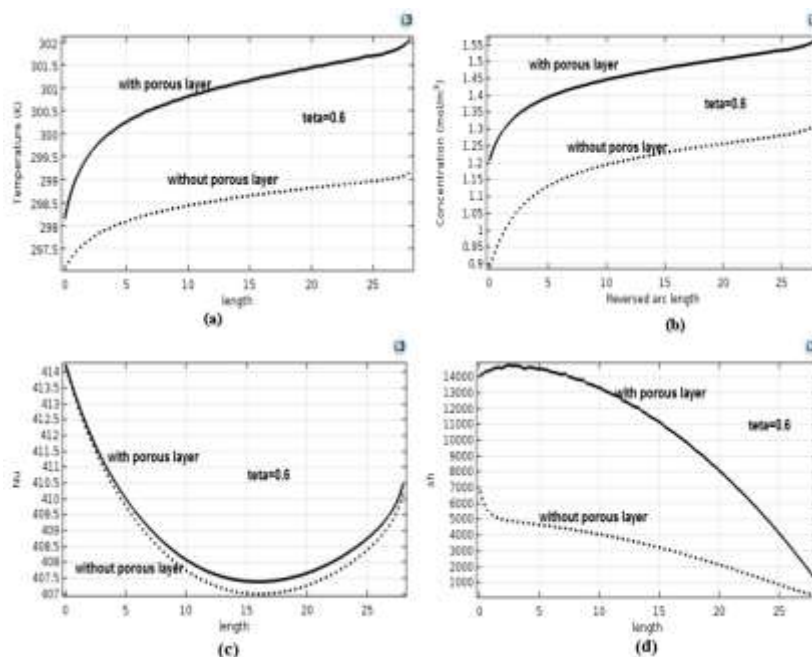
معادله انتقال جرم جریان گاز نیز بصورت زیر ارائه می گردد:

$$u_g \frac{\partial w}{\partial x} + v_g \frac{\partial w}{\partial y} = D \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (2-6)$$

در معادلات فوق زیرنویس g متغیر جریان گاز می باشد و متغیرهای w ، ρ ، θ ، α و D به ترتیب غلظت جرمی، دانسیته، گرانیوی سینماتیکی، ضرایب نفوذ حرارتی و جرمی گاز می باشند.

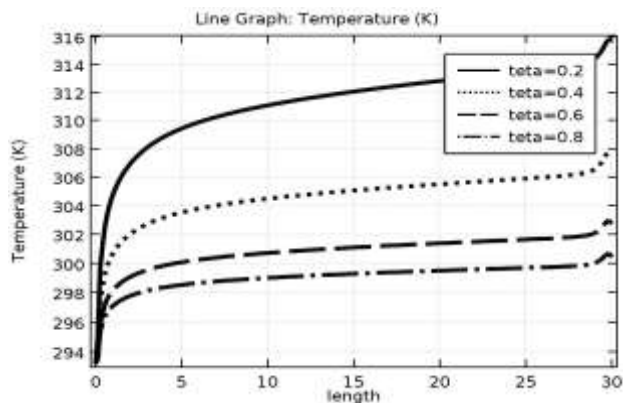
نتایج

در ابتدا بعنوان اولین شرط اثر وجود و یا عدم وجود لایه متخلخل بر راندمان انتقال حرارت و جرم در فرآیند تبخیر فیلم مایع را مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار با استفاده از نرم افزار، معادلات انتقال جرم و حرارت را تحت حالت های وجود لایه متخلخل و عدم وجود لایه متخلخل حل می شود. $teta$ میزان تخلخل یا کسر فضای خالی در ناحیه متخلخل را نشان می دهد. بر اساس نمودار های ارائه شده در این شکل استنباط می شود که دمای فصل مشترک گاز-مایع در حضور محیط متخلخل به مقدار قابل ملاحظه ای بیشتر است. اثر این بیشتر بودن دما بواسطه حضور لایه متخلخل نرخ تبادل جرم را تحت تاثیر قرار می دهد. با توجه به نمودار ارائه شده برای پارامتر غلظت، واضح و مشخص است که همانند دما، غلظت فصل مشترک فازها نیز در حضور لایه متخلخل بیشتر است. بالاتر بودن غلظت و دما در فصل مشترک فازها در حضور لایه متخلخل، به منزله بالاتر بودن نرخ تبادل حرارت و جرم در این ناحیه می باشد. علاوه بر این نمودار های ارائه شده برای اعداد بدون بُعد ناسلت و شروود- که به ترتیب تعبیری از نرخ تبادل حرارت و نرخ تبادل جرم می باشند- کاملاً گویای این است که وجود لایه متخلخل فاکتوری اساسی و تاثیر گذار در بالا بردن راندمان انتقال حرارت و انتقال جرم است.



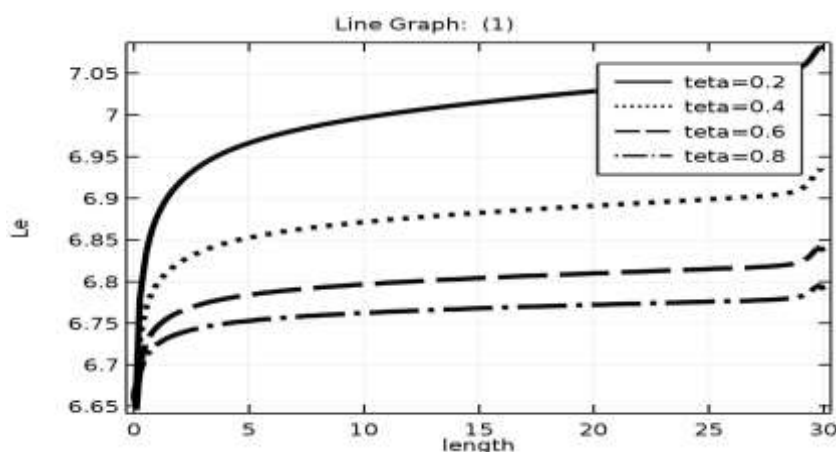
شکل ۲: انرژی اثر وجود لایه متخلخل روی پروفیل دما؛ غلظت؛ عدد ناسلت و شروع

آنچه که از شکل ۲ استنباط می شود این است که بطور کلی در ابتدا نرخ افزایش دما ماکزیمم بوده و دما بطور قابل ملاحظه تا طول ۲cm از صفحه افزایش می یابد. نرخ افزایش دما رفته رفته با حرکت در طول صفحه کاهش می یابد تا اینکه در نهایت دمای فصل مشترک مایع ثابت شده و برابر با دمای هوا می گردد. هرچقدر میزان تخلخل کمتر باشد، میزان تغییرات دما با در طول بیشتر خواهد بود. به عبارت دیگر در شرایط کاملا یکسان (طول های مشابه)، ساختار با تخلخل پایین میزان افزایش دمای قابل ملاحظه تری نسبت به ساختار های با تخلخل بالا دارد. همچنین همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است در طول های مشابه دمای نقطه انتخاب شده جهت داده گیری در ساختار با تخلخل پایین بیشترین مقدار ممکن را دارد. پس بعنوان یک نتیجه، کاهش درجه تخلخل لایه متخلخل اشباع قادر به افزایش دمای سطح تماس گاز و مایع می باشد. زیرا کاهش درجه تخلخل در لایه متخلخل، ناحیه انتقال حرارت فیلم مایع را افزایش داده و اجازه می دهد که حرارت به شکل موثرتری به فصل مشترک فیلم گاز مایع منتقل گردد.



شکل ۳: پروفیل دما در مقادیر مختلف تخلخل لایه روی فیلم ریزان

روند تغییرات عدد لوئیس در طول صفحه به ازای مقادیری متفاوت برای میزان تخلخل در شکل ۴ نشان داده شده است. مقدار عدد لوئیس در فصل مشترک فازها در طول صفحه تحت مقادیر مختلف میزان تخلخل پیوسته افزایش می یابد. این قاعده به این معنی است که هر چه در طول صفحه به سمت پایین حرکت می کنیم، ضخامت لایه مرزی حرارتی و لایه مرزی جرمی به گونه ای تغییر می کند که نسبت آنها پیوسته افزایش می یابد (رشد لایه مرزی حرارتی بیشتر از رشد لایه مرزی جرمی می باشد). علاوه بر این می توان دریافت که در طول مشخصی از صفحه، عدد لوئیس تحت شرایطی که میزان تخلخل پایین باشد مقادیر بزرگتری را اختیار می کند.



شکل ۴: روند تغییرات عدد لوئیس در طول صفحه به ازای میزان تخلخل متفاوت

نتیجه گیری

مقاله حاضر اطلاعاتی را در مورد افزایش انتقال جرم و انتقال حرارت از تبخیر فیلم مایع با استفاده از صفحه ای که با لایه متخلخل اشباع پوشیده شده است، ارائه می دهد. در ابتدا توزیع محوری غلظت، دما، سرعت و فشار را در هر دو فاز تشریح شد. سپس مقایسه ای بین دو پیکربندی سیستم (با و بدون حضور لایه متخلخل) انجام شد تا تاثیر حضور لایه متخلخل را بر روی انتقال جرم و حرارت مشخص شود. علاوه بر این توزیع محوری فلاکس تبخیر، اعداد بدون بُعد مربوط به پدیده های جرم و حرارت (Sh ، Nu و Le)، اثرات ضخامت و میزان تخلخل لایه متخلخل روی عملکرد متوسط انتقال جرم و حرارت نیز مورد بررسی قرار گرفت. پس از انجام مدل سازی با استفاده از نرم افزار، ارزیابی نتایج حاصل حاکی از آن بود که قرار دادن لایه ای متخلخل بر روی صفحه نرخ تبادل حرارت و جرم را بین دو فاز را بهبود می بخشد. علاوه بر این با توجه به نمودارهای گزارش شده، واضح و مشخص است که حضور لایه متخلخل تحت شرایط میزان تخلخل پایین، ضخامت لایه متخلخل کمتر و نیز سرعت های بالاتر جریان های عملیاتی، مؤثر تر بوده و راندمان بالاتری را فراهم می کند.

همچنین ضخامت و میزان تخلخل لایه متخلخل کمتر، تولید غلظت جرمی بیشتر و دمای سطح تماس بالاتری می نمایند، بنابراین باعث افزایش عملکرد انتقال جرم و حرارت در امتداد سطح تماس فیلم مایع می شود. در بخش انتهایی کار نیز اثر ضخامت و میزان تخلخل لایه متخلخل بر روی اعداد بدون بعد ناسلت و شروود-که پارامترهایی توصیف کننده جهت ارزیابی میزان تبادل حرارت و جرم محسوب می

شوند-مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل بیانگر آن بود که تحت ضخامت های کمتر و میزان تخلخل پایین تر، این اعداد مقادیر بزرگتری را اختیار می کنند و این به منزله نرخ تبادل حرارت و جرم بیشتر و مؤثرتر بین فازها می باشد.

لازم به ذکر است که در تمام ارزیابی های صورت گرفته به منظور تعیین اثر میزان تخلخل و ضخامت لایه متخلخل بر نرخ تبادل جرم و حرارت، در شرایط مشابه همواره تاثیر افزایش میزان تخلخل از تاثیر افزایش ضخامت لایه متخلخل بیشتر بوده است.

منابع و مراجع

1. Leu, J.-S., J.-Y. Jang, and Y. Chou, Heat and mass transfer for liquid film evaporation along a vertical plate covered with a thin porous layer. *International journal of heat and mass transfer*, 2006. 49(11): p. 1937-1945.
2. Calumet and I.W.T.D. Hecla, *Wolverine Trufin Engineering Data Book: Thermal Design and Application of Wolverine Trufin Type S/T*. Calumet and Hecla, Wolverine Tube Division.
3. Maroulis, Z.B. and G.D. Saravacos, *Food process design*. Vol. 126. 2003: CRC Press.
4. Cherif, A., et al, Experimental and numerical study of mixed convection heat and mass transfer in a vertical channel with film evaporation. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011. 50(6): p. 942-953.
5. Terzi, A., et al., Liquid film evaporation inside an inclined channel: Effect of the presence of a porous layer. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016. 109: p. 136-147.
6. Leu, J.-S., J.-Y. Jang, and W.-C. Chou, Convection heat and mass transfer along a vertical heated plate with film evaporation in a non-Darcian porous medium. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009. 52(23): p. 5447-5450.
7. Bellouch, L., et al., Numerical study of heat and mass transfer in liquid film evaporation by a porous layer within a vertical flow channel.
8. Experimental investigation of capillary-assisted solutionwetting and heat transferusing a micro-scale, porous-layercoating on horizontal-tube, falling-film heat exchangerSangsoo Lee, Batikan Ko ̇roglu, Chanwoo Park Department of Mechanical Engineering, University of Nevada, 1664 N. VirginiaStreet, Reno, NV 89557-0312, United States.