

بررسی و شبیه سازی عددی میزان رسوبگیری انتقال گرما و جریان سیال در مبدل های حرارتی صفحه ای تخت با نرم افزار CFD

علی عبدالخانی^{(1)*} - حسن کریمی نسب⁽¹⁾ - زینب صادقی⁽²⁾ - عباسعلی
چنگلوایی⁽³⁾

* و (1) امیدیه- باشگاه پژوهشگران جوان - دانشگاه آزاد اسلامی
واحد امیدیه

Abdolkhani_a@yahoo.com

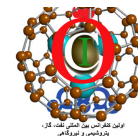
(2) اراک- گروه مهندسی شیمی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد فراهان

(3) امیدیه- استادیار گروه مهندسی شیمی - دانشگاه آزاد اسلامی
واحد امیدیه

چکیده

بررسی های اخیر نشان داده اند که صفحات مبدل های گرمایی تجاری مشابه با الگوهای چین خوردگی مختلف، در سرعت های بسیار متفاوت تحت شرایط فرآیند مشابه، رسوب گیری شده اند. این تفاوتها به اثرات توزیع جریان بر سرعت های رسوب گیری در کانال های صفحه، نسبت داده شده اند. در نتیجه، اثرات توزیع جریان بر رسوبگیری، بصورت عددی با استفاده از صفحات مبدل های گرمایی با و بدون توزیع کننده های جریان، مورد مطالعه قرار گرفتند. هدف طراحی های مختلف توزیع کننده این بود که به یک توزیع جریان یکنواخت تر در کانال های صفحه ای دست یابیم. شبیه سازی های جریان برای طراحی های مختلف توزیع کننده و اشکال مختلف صفحه، انجام شده اند. نتایج محاسباتی به خوبی قابل مقایسه بودند.

کلمات کلیدی: مبدل های گرمایی صفحه ای، طراحی صفحه، الگوهای تشکیل رسوب، توزیع جریان و دما، دینامیک محاسباتی سیال



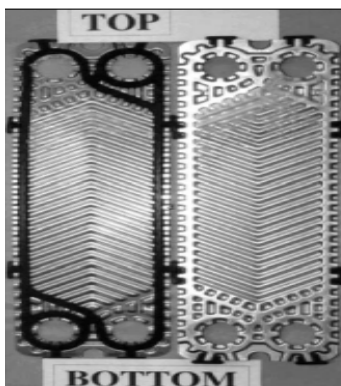
1- مقدمه :

یک تحقیق برای وزارت بازرگانی نیوزلند در سال 1990، بر 2000 مبدل‌های گرمایی از 200 شرکت، نشان داد که تقریباً 90 درصد از مبدل‌های گرمایی، دچار نوع تشکیل رسوب بودند. [1] چون حدود 14 درصد از تبادل‌گرهای مورد مطالعه، از نوع صفحه ای بودند. درک مکانیسم های تشکیل تهنشست های رسوب (جرم گرفتگی)، و بهتر کردن طراحی کنونی مبدل‌های گرمایی صفحه ای¹ (PHE) به منظور کاهش تشکیل رسوب، اهمیت زیادی دارد.

2- مطالعات گذشته :

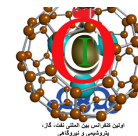
بررسی های اخیر [2]، اهمیت الگوهای چین خوردگی صفحه ای که توزیع کننده نامیده می شوند، را در نزدیکی مناطق ورودی و خروجی سیال، نشان داده اند. در شرایط پاکیزگی، طراحی بهبود یافته چین خوردگی منطقه ورودی و خروجی صفحات جریان کناری APV TRI باعث افزایش انتقال گرما و کاهش افت فشار نسبت به صفحات جریان مورب Alfa Laval P01 شد. پس از شروع تشکیل رسوب، توزیع جریان خراب شد و به رسوب گیری بیشتری بر صفحات قبلی، منجر گردید تا بر صفحات جدیدتر تحت این شرایط، تفاوت هایی با ضریب 2 در کاهش انتقال گرما و ضریب 3 در افزایش افت فشار برای این دو نوع صفحه، مشاهده شد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که تفاوت های این دو نوع صفحه، به اثرات توزیع جریان بر سرعت تشکیل رسوب در کانال های صفحه، نسبت داده می شود بنابراین، بررسی اثرات توزیع جریان بر سرعت رسوبگیری، به صورت عددی اهمیت دارد.

یک الگوی رسوبگیری سولفات کلسیم (caso4) بر یک صفحه Alfa Laval P01 تجاری، در شکل (1) نشان داده شده است [3]. محلول caso4 در حین جاری شدن از گوشه پایین صفحه به گوشه فوقانی، گرم شد. واضح است که تهنشینی یکنواخت نیست بلکه در گوشه فوقانی روبروی دریچه خروجی، و در نقاط تماس صفحه، متمرکز است. بسته به شرایط غالب، یک الگوی مشابه گاهی برای گوشه پایینی مجاور دریچه ورودی، مشاهده شد. البته مقدار تهنشست نزدیک ورودی صفحه همیشه به خاطر دمای حجمی و دیواره پایین تر، کمتر بود.



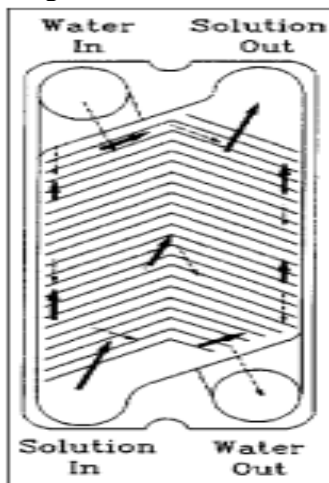
شکل (1) : یک جفت صفحه رسوب گرفته

¹ : plate heat exchanger



در شکل (2) الگوی جریان صفحات جریان مورب برای یک سیستم PHE با آب به عنوان محیط گرمایش و یک محلول به عنوان سیال فرآیند، بصورت شماتیک نشان داده شده است. فلش های یکدست و فلش های منقطع به ترتیب جریان محلول و جریان آب را نشان می دهند. طول یک فلش نشانه بزرگی سرعت جریان محلی است. از شکل (1) و (2) می توان استنباط کرد که دمای بالا و سرعت جریان پایین دو معیار اصلی و ضروری برای وقوع تهنشینی، هستند. وقتی فقط یکی ازین دو وجود دارد، تهنشینی ممکن است رخ بدهد اما سرعتش به شرایط محلی، نظیر زبری سطح، ماده سطح، میزان فوق اشباع، بسیار وابسته خواهد شد.

از آنجا که پیشگیری خیلی مقرون به صرفه تر از درمان است، بهترین راه برای به حداقل رساندن هزینه های ناشی از رسوبگیری این است که از وقوعش پیشگیری شود. برای این کار، لازم است صفحه ها مجدداً طراحی شوند تا از بوجود آمدن مناطق با سرعت جریان پایین اجتناب شود، و یک توزیع جریان یکنواخت تر در کانال های صفحه غالب شود. برای بدست آوردن اطلاعات لازم، آزمایشات رسوبگیری مبدل های گرمایی و مرئی سازی جریان با صفحات تخت بدون توزیع کننده، انجام شده اند.



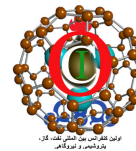
شکل 2: الگوی جریان مورب در مبدل های گرمایی صفحه ای

از نتایج آزمایشی [5] برای بررسی شبیه سازی با نرم افزار¹ CFD جریان و توزیع های دما در کانال های صفحه تخت با اشکال هندسی مشابه، استفاده شده است. از مدل تایید شده CFD می توان برای شبیه سازی طراحی های مختلف توزیع کننده صفحه استفاده کرد تا به یک توزیع جریان همگن تر درون کانال صفحه دست یابیم.

جدول 1: ابعاد و اطلاعات مربوط به صفحات تخت، Alfa Laval P01 ، Alfa Laval M3 (اندازه های موثر: اندازه های منطقه مبدل های حرارتی هستند)

Plate type	a Laval P01	a Laval M3	Flat
Corrugation angle, α	60°	60°	±

¹ : computational fluid dynamics



Port diameter	m0.0300	0.0300m	0.0320m
Plate length	m0.4300	0.4300m	0.4300m
Plate width	m0.1260	0.1260m	0.1260m
Effective plate length	0.3960m	0.3960m	0.3960m
Effective plate width	m0.1000	0.1000m	0.1000m
Nominal plate spacing, bp	m0.0024	0.0024m	0.0024m
Plate thickness	m0.0006	0.0005m	0.0020m
Heat transfer area per plate	0.0320m ²	0.0320m ²	0.0270m ²

3- نرم افزار شبیه ساز¹ CFD :

آنچه که در اکثر متون علمی مربوط به پدیده های جریان در PHE جا افتاده است، مدلسازی CFD الگوهای جریان محلی در طراحی های مختلف صفحه مبدل های گرمایی و تاثیر آنها بر انتقال حرارت، افت فشار و رفتار رسوبگیری است. تاثیر طراحی های توزیع کننده صفحه، بصورت محاسبه ای بررسی نشده است. این مسائل باعث شروع مطالعه کنونی شد، و در این مطالعه مدلسازی گسترده CFD انجام شد تا جریان در یک کانال PHE تخت بررسی شود.

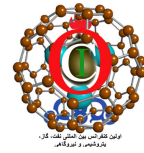
مدلسازی CFD جریان سیال با استفاده از یک پکیج تجاری CFX، بر یک PC پنتیوم، که به وسیله eXccrd به یک Alphaserver 8400 5/440 با 8 پردازنده متصل شده بود، انجام شد. سیال مورد نظر آب بود، و خواصش از پایگاه داده CFX به دست آمد. شرایط ورودی نظیر سرعت جریان و دما به همراه فشار در خروجی تعیین شدند. در محاسبات دقت مضاعف، ماکزیمم تدرانس جرمی $1 \times 10^{-7} \text{ KG.S}^{-1}$ برای مجموع باقیمانده مطلق همه خانه های شبکه، بدست آمد.

4- خواص هندسی واقعی یک مبدل گرمایی صفحه تخت :

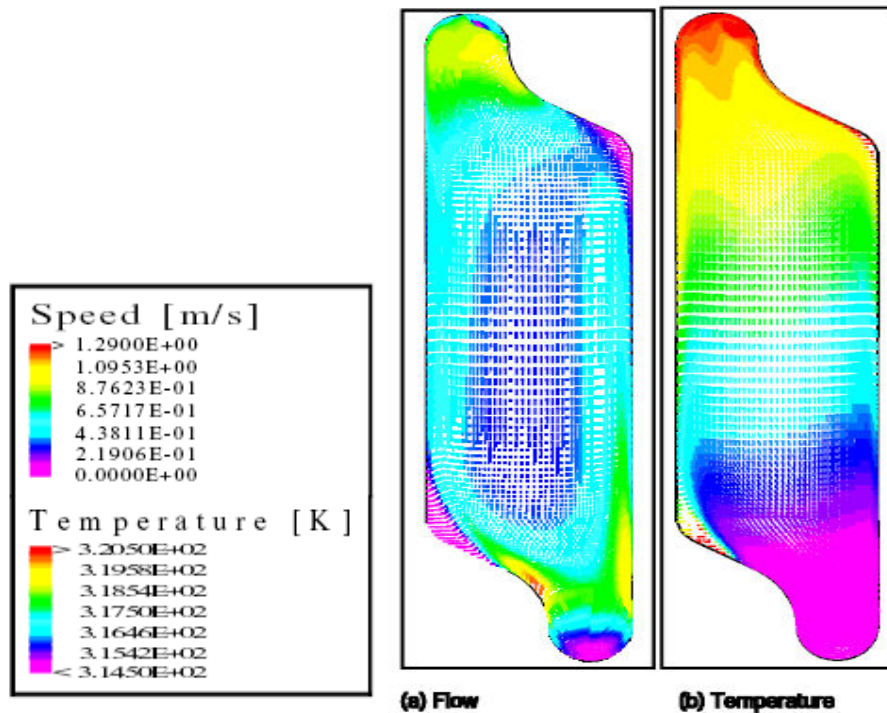
ویژگی های هندسی واقعی PHE تخت به کار رفته در این تحقیق، مدلسازی شدند. همانطور که قبلاً گفته شد، صفحات تخت به کار رفته، شکل و ویژگی های هندسی ای مشابه صفحات Alfa Laval M3 دارند. همه شبیه سازی ها با استفاده از مختصات سه بعدی با دستگاه مختصات کارتزینی انجام شدند. استقلال مختصات با استفاده از مدل $k-\epsilon$ ، تحت شرایط پایدار، همدم و تراکم ناپذیر، تغییر داده شد، و با $150 \times 60 \times 5$ خانه در جهات $X*Y*Z$ برای جریان های مورد نظر، بدست آمد.

شبیه سازی انتقال حرارت و جریان با استفاده از مدل $k-\epsilon$ برای یک جریان تراکم ناپذیر تحت شرایط پایدار، انجام شدند. شکل های (a) 3 و (b) 3 توزیع های جریان و دمای حاصله برای سرعت جریان 0.35 m.s^{-1} ، را نشان می دهند. دو منطقه بازگردش (recirculation) مشاهده شد، یکی در گوشه مجاور دریچه ورودی و دیگر در دریچه خروجی جریان، گرچه در گوشه مجاور دریچه خروجی کند است، اما در گردش نیست. افت فشار مربوط در کانال صفحه $1/3 \times 10^3 \text{ pa}$ است که از محدوده 8 درصدی افت فشاری است که با آزمایش ($1/4 \times 10^3 \text{ pa}$) اندازه گیری شد. پیش بینی های CFD برای کانال صفحه تخت، مطابقت معقولی با نتایج آزمایشی مرئی سازی

¹ دینامیک محاسباتی سیالات:



جریان و رسوب گیری داشتند، اما از لحاظ نقطه اتصال مجدد منطقه بازگردش جریان اصلی در کانال صفحه تخت، ناهماهنگی هایی وجود دارد. طول اتصال مجدد¹ 0.05 m است که کوتاه تر از مقدار آزمایشی 0.10 m می باشد.

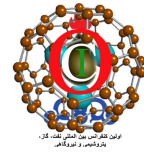


شکل 3 : توزیع های (a) جریان ، (b) دما برای طرح A توزیع کننده با مدل تنش رینولدز دیفرانسیلی² (DSM) ، منطقه بازگردش و منطقه کم سرعت در گوشه های مجاور دریچه های ورودی و خروجی، بزرگتر از آنهایی هستند که با استفاده از مدل k-ε بدست آمدند. گرچه DSM قادر است منطقه بازگردش نزدیک دریچه ورودی را با شباهت بیشتری به نتایج آزمایشی، پیش بینی کند، اما نقطه اتصال مجدد مربوط را کمتر پیش بینی می کند.

به علاوه زمان CPU مورد نیازش حدود دو برابر سایر مدل های به کار رفته است. به عبارت دیگر، اجرای DSM حدود 35 روز طول کشید، اما اجرای سایر مدل ها فقط یک روز به طول انجامید. در مبدل های گرمایی صفحه ای واقعی، توزیع دمای دیواره یک صفحه اصلاً یکنواخت نیست. البته برای تسهیل شبیه سازی های انتقال حرارت، برای بخش هایی از دیوارهای کانال، دمای ثابت بالاتری اختصاص داده شد تا سیال ورودی. چون دمای سیال خروجی از نتایج آزمایشی بدست آمده

¹ : Differential Reynolds Stress Model

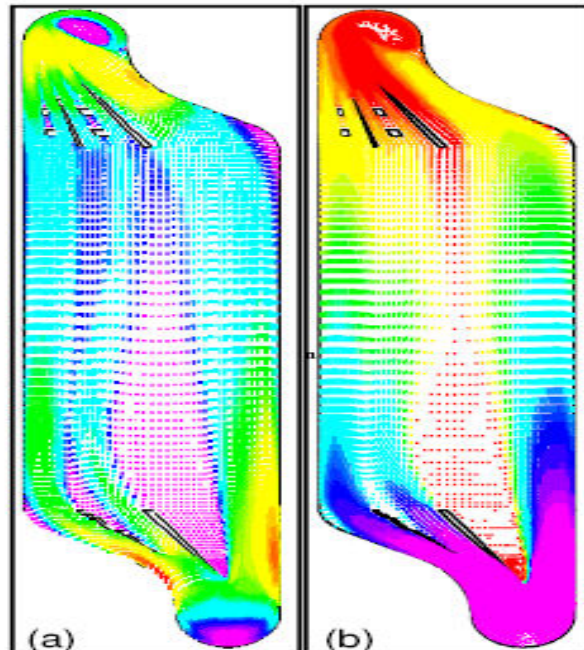
² : دینامیک محاسباتی سیالات:



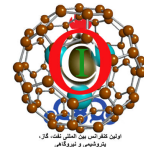
معلوم است، دمای دیواره از طریق آزمون و خطا افزایش داده شد تا دمای شبیه سازی شده خروجی به حدی برسد که در آزمایشات [5] بدست آمد. برای شکل 3 (b)، دمای دیواره 65°C در نظر گرفته شد. با مقایسه توزیع های جریان و دما، که با استفاده از مدل k-ε شبیه سازی و به ترتیب در شکل های 3 (a) و 3 (b) نشان داده شده اند، می توان دید که رسوب گیری در مناطقی رخ می دهد که سرعت جریان پایین و دما بالا است.

5- طراحی های توزیع کننده ها در تبادلهای حرارتی صفحه تخت :

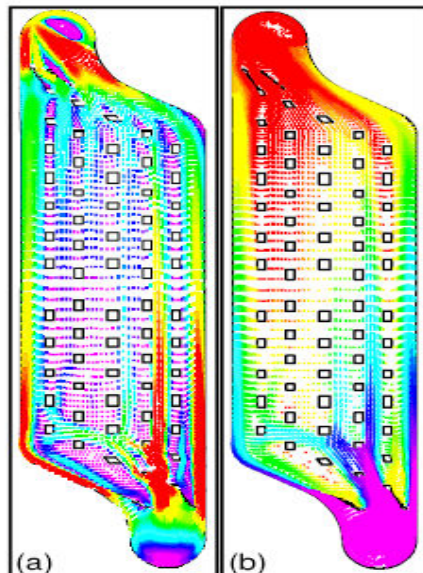
در همه شبیه سازی هایی که برای طرح های مختلف توزیع کننده های صفحه انجام شدند، از مدل k-ε با یک سرعت جریان کانال اسمی 0.035 m.s^{-1} استفاده شد. اشکال هندسی مختلف توزیع کننده ها، از طریق مسدود کردن برخی خانه های شبکه (مختصات)، ایجاد شدند تا جریان مسدود و مجدداً جهت دهی شود. برخی از این طرح ها به صورت آزمایشی نیز بررسی شده اند. توزیع های پیش بینی شده جریان و دما برای طرح ها رامی توان با الگوهای رسوب گیری آنها که بصورت آزمایشی بدست آمده اند، مقایسه کرد. شکل های 4 تا 6 توزیع های جریان و دمای طرح های B و C و D توزیع کننده ها را نشان می دهند. این شکل ها همگی کلیدهای یکسانی برای سرعت و دما دارند، که به ترتیب از 0.00 تا 1.29 m.s^{-1} و از 314.5 k تا 320.5 k می باشند. در طرح C از انسدادهایی در بخش های توزیع کننده تشکیل شده است، اما طرح C انسدادهایی هم در توزیع کننده و هم در مناطق اصلی انتقال گرما دارد. اما طرح D یک شکل هندسی صفحه تخت اصلاح شده، فاقد انسداد است.



شکل 4: توزیع های (a) جریان، (b) دما برای طرح B توزیع کننده با رجوع به شکل (4)، توزیع های جریان شبیه سازی شده برای طرح B نشان می دهند که این توزیع کننده ها، در تلاش برای افزایش انتقال حرارت از طریق حذف مناطق بازگردش و یا کم سرعت در گوشه های

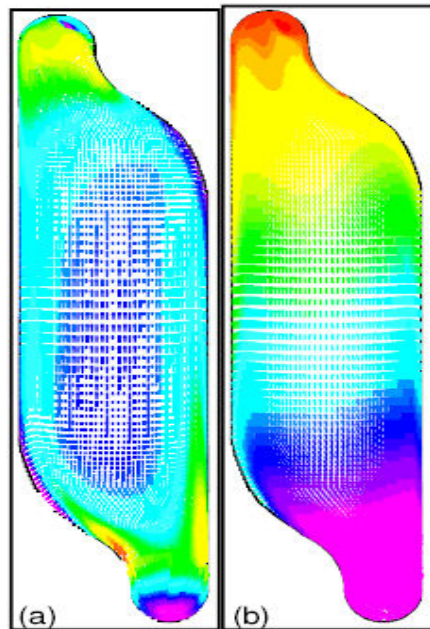


مجاور دریچه های ورودی و خروجی، مناطق دیگری از بازگردش و سرعت کم، ایجاد می کنند. این مناطق جریان مطلوب در پایین دست همه توزیع کننده ها، بویژه توزیع کننده های طویل تر، تشکیل می شوند. بنابراین این نقطه ضعف و عیب داشتن توزیع کننده های طویل را تایید می کند. وقتی سیال در مناطق کم سرعت بیشتر گرم می شود، در شبیه سازی های انجام شده مناطق کم سرعت بر مناطقی با دمای مایع بالا (یعنی فوق اشباع) افزایش یافته CASO4، مقارن می شوند (شکل های 3 تا 6). در آزمایشات PHE، جریان های سیال گرم، مخالف سیال سرد حرکت می کنند. دمای دیواره ها در کانال های سرد، بجای اینکه مثل شبیه سازی ها ثابت بماند، به تدریج از دریچه خروجی به سمت دریچه ورودی کاهش می یابد. با این وجود با رجوع به شکل ها (4)، مناطق پیش بینی شده کم سرعت و پر دما مطابقت معقولی با مکانهای رسوب آزمایشی متناظر دارند.



شکل 5: توزیع های (a) جریان، (b) دما برای طرح C توزیع کننده

همانطور که در شکل (5) نشان داده شده است، طرح C از توزیع کننده ها 5 ستون انسداد مربعی تشکیل شده است که طوری چیده شده اند که یک خط 60 درجه بر جهت جریان اصلی شکل می دهند، شبیه زاویه چین خوردگی صفحات Alfa Lvavl بررسی شد. این طرح اگرچه در کاهش مناطق اصلی کم سرعت موفق بوده است، اما مناطق بیشتری ایجاد می کند که برای تشکیل رسوب مناسبند.



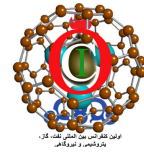
شکل 6: توزیع های (a) جریان ، (b) دما برای طرح D توزیع کننده جالب اینکه اکثر توزیع یکدست جریان برای طرح فاقد توزیع کننده رخ می دهد (شکل 3). این شکل هندسی صفحه را می توان با طرح D بهتر کرد. در این طرح مناطق کم سرعت، یعنی دو گوشه مقابل دریچه های ورودی و خروجی حذف شده اند. زیرا صفحات صنعتی، انحنای مقعر عمیقی در آن گوشه ها دارند که جریان های بازگردش و کم سرعت را القا می کنند. چون الگوهای رسوبگیری و الگوهای جریان در کانال های صفحه تخت نامتقارنند، طرح D نیز یک شکل هندسی صفحه نامتقارن دارد. گرچه هیچ بازگردشی در گوشه های صفحه با طرح D مشاهده نمی شود (شکل 6)، سرعت جریان اطراف کم است. بنابراین طرح D را می توان اصلاح کرد تا صفحات خط جریان داشته باشند. صفحات و واشرهای مبدل های گرمایی را می توان مجدداً طراحی کرد تا جریان در دو گوشه فوق الذکر مسدود شود.

از شبیه سازی های انجام شده مشخص است که شکل هندسی صفحه و هرگونه محدودیت داخلی در بخش های اصلی انتقال گرما و یا توزیع کننده، اثرات عمیقی بر توزیع های جریان و دما دارند. این توزیع ها هم بر رفتار رسوب گیری در کانال صفحه تاثیر می گذارند.

6- بحث و نتیجه گیری:

برای جلوگیری از وقوع رسوبگیری، توزیع کننده هایی روی صفحات تخت قرار بگیرند تا جریان را به سمت مناطق کم سرعت در گوشه های صفحه مجاور درگوشه های صفحه مجاور دریچه های ورودی و خروجی، هدایت کنند، البته مناطق کم سرعت بیشتری در مسیر این توزیع کننده ها ایجاد می شود، و چون چیزی برای فروپاشیدن این مناطق نامطلوب وجود ندارد، رسوب بیشتری بر این صفحات تشکیل می شود تا بر صفحات تخت فاقد توزیع کننده.

جریان سیال در یک مبدل صفحه تخت با و بدون توزیع کننده، تحت شرایطی شبیه آزمایشات رسوبگیری، شبیه سازی شد. پیش بینی های نرم افزار CFD برای کانال صفحه تخت مطابقت خوبی با نتایج آزمایشی



مرئی سازی جریان و رسوبگیری داشتند، اما عدم مطابقت هایی از لحاظ نقطه اتصال مجدد منطقه اصلی بازگردش جریان در کانال صفحه تخت، وجود دارد. مدل k-ε می تواند ویژگی های کلی جریان را با میزان صحت معقولی در یک زمان CPU منشأً کوتاه، پیش بینی کند.

یک راه دست یابی به توزیع یکدست تر جریان در صفحات تخت با صفحات تخت مبدل های صنعتی مطالعه شده، طراحی مجدد شکل هندسی صفحه است تا گوشه های مجاور دریچه ها، هموارتر شوند. شبیه سازی ها نشان می دهند که این هندسه مجدداً طراحی شده هیچ جریان بازگردشی در گوشه های صفحه ندارد، و در نتیجه برای رسوبگیری کمتر مستعد و آسیب پذیر است.

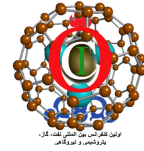
کار انجام شده بر CFD باید به کانال های جریان مدل سه بعدی با هندسه ای شبیه صفحات تجاری Chevron، توسعه داده شود. این به گونه ای است که حرکت زیگزاگ سیال مشاهده شده در آزمایش را می توان شبیه سازی کرد. وقتی این نتایج معتبر هستند که بهبودهایی در طرح فعلی صفحه را می توان با اطمینان خاطر، از طریق شبیه سازی های CFD، پیش بینی کرد. به علاوه، شبیه سازی های تبادلگر حرارتی به جای اینکه دمای ثابت دیواره برای کانال صفحه تحمیل کنند، باید با چیدمان سه کانالی شبیه آنچه در آزمایش استفاده شد، انجام شوند. اگرچه این اجرای CFD دقت بیشتری در مورد جریان ویژگی های افت فشار و انتقال حرارت در یک مبدل صفحه تخت تجاری به ما می دهد، اما به منابع محاسباتی نیز نیاز است.

7- تشکر و قدردانی:

از حمایت های باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه و در امر تحقیق تشکر و قدر دانی می شود.

8 - منابع:

- [1] Steinhagen, R., Müller-Steinhagen, H. M., and Maani, K., 1992, Problems and costs due to heat exchanger fouling in New Zealand industries, Heat Transfer Eng, 14(1): 19±30.
- [2] Bansal, B., 1994, Crystallisation fouling in plate heat exchangers, PhD Diss, (Department of Chemical and Materials Engineering, University
- [3] Kho, T., 1998, Effect of flow distribution on scale formation in plate and frame heat exchangers, PhD Diss, (Department of Chemical and
- [4] Kho, T., Zettler, H. U., Müller-Steinhagen, H., and Hughes, D., 1997, Effect of flow distribution on scale formation in plate and frame heat exchangers, Chem Eng Res Des, Trans IChemE, Part A, 75 (A7): 635±640.
- [5] T. KHO and H. MÜLLER-STEINHAGEN - AN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER FOULING AND FLUID FLOW IN FLAT PLATE HEAT EXCHANGERS



Numerical investigation And simulation of heat transfer fouling and fluid flow in flat plate heat exchangers CFD software

Ali Abdolkhani^{a,*}, hasan karimi nasab^a, zeinab sadeghi^b, abasali changalvaii^c

^{a,*} *Young Researchers Club, Islamic Azad University Omidieh Branch*

^b *Chemical Engineering Department, Islamic Azad University farahan Branch, Iran*

^c *Chemical Engineering Department, Islamic Azad University Omidieh Branch , Iran*

Abstract

Recent investigations have shown that similar commercial heat exchanger plates with different corrugation patterns, fouled at very different rates under identical process conditions. These differences are attributed to the effects of flow distribution on fouling rates in the plate channels. Consequently, the effects of flow distribution on fouling were studied using flat heat exchanger plates with and without flow distributors. The aim of the different distributor designs was to obtain a more even flow distribution within the plate channels. Flow simulations were performed for different distributor designs and different plate shapes. Computational results compared well with those obtained.

Keywords: plate heat exchangers; plate design; fouling patterns; flow and temperature distribution; computational fluid dynamics