



ارائه روشی نوین جهت بهبود انتقال حرارت در راکتورهای شکست حرارتی هیدروکربن‌ها

علی منصوری مقرب^۱، مهدی ارجمند^{۱،۲*}، جعفر توفیقی داریان^۳، فرهاد خراشه^۴

۱. گروه مهندسی شیمی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. مرکز تحقیقات نانو، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳. دانشکده مهندسی فرایند، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴. دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

* نویسنده مسئول: m_arjmand@azad.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲

چکیده:

در این مقاله که به کاربرد پدیده‌های میان رشته‌ای می‌پردازد به بررسی روش‌های نوین بهبود انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی در مهندسی مکانیک پرداخته شده سپس به کاربرد این روش‌ها در راکتورهای شیمیایی می‌پردازد. از آنجا که در یک راکتور شیمیایی علاوه بر انتقال حرارت و افت فشار که دو مقوله مهم در مبدل‌های حرارتی به شمار می‌روند، واکنش شیمیایی نیز اضافه می‌شود لذا استفاده از روش‌های بهبود انتقال حرارت با حساسیت بیشتر بررسی می‌شوند به طوری که کمترین افت فشار و بیشترین انتقال حرارت را داشته باشند. در این تحقیق استفاده از فین‌های طولی مستقیم و مارپیچ در راکتورهای شکست حرارتی بررسی شد و مشخص گردید که هر کدام از این نوع فین‌ها باعث افزایش افت فشار در اثر نیروی اصطکاک یا نیروی پسا^۱ می‌شوند که تاثیر منفی بر واکنش شیمیایی دارند. سپس ضخامت زیر لایه ویسکوز برای سیال گازی محاسبه شد و بعد از آن با ارائه روشی نوین با ایجاد شیارهای محیطی در جداره لوله رژیم جریان کنار لوله از آرام به مغشوش تبدیل گردید. پس از جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پیشنهاد شد که با استفاده از شیارهای کوچک در جداره راکتور می‌توان علاوه بر کاهش افت فشار ناشی از نیروی درگ با افزایش مولفه شعاعی سرعت به میزان بیش از ۳ برابر لوله صاف انتقال حرارت از جداره لوله به سیال را در زیر لایه ویسکوز بهبود بخشید.

کلمات کلیدی: انتقال حرارت، افت فشار، فین، راکتور شکست حرارتی هیدرو کربنها، زیر لایه ویسکوز.

مقدمه

مهندسی مکانیک به‌عنوان پیشگام در ابداع روش‌های بهبود انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی و بویلرها می‌باشد و مهندسی شیمی با استفاده از روش‌های به‌کاربرده شده در این شاخه از علم آن دسته از ابداعاتی که در راکتورهای شیمیایی قابل استفاده هستند را به کار می‌برد.

الفین‌های سبک، آجر بنای صنعت پتروشیمی می‌باشند، این مواد اکثراً به‌وسیله فناوری شکست حرارتی که یک واکنش گرماگیر است و با اعمال حرارت بالا (۷۵۰ تا ۸۶۰ درجه سانتی‌گراد و فشار متوسط ۱-۵ بار، در حضور بخار آب و به دور از هوا در یک لوله به قطر تقریبی ۱۰ سانتی‌متر و طول متوسط ۵۰ متر تولید می‌شوند) علی‌رغم ظهور فناوری‌های جدید (MTO^۲, MTP^۳, OCM^۴, PDH^۴, ...) کماکان پیش‌بینی می‌شود، فناوری کراکینگ حرارتی اقتصادی‌ترین روش جهت تولید

^۱ drag

^۲ methanol to olefin



این مواد تا چند سال آینده باشد [۱۲]. اگرچه بیش از ۵۰ سال از تولد این فناوری گذشته و کارهای زیادی در زمینه بهینه‌سازی فرایند صورت گرفته است ولی در زمینه بهبود انتقال حرارت در راکتور کراکینگ هنوز جای کار کردن وجود دارد. در مطالعات اولیه به عمل آمده مشاهده گردید که محققین برای بهبود انتقال حرارت درون لوله‌های راکتور که معمولاً دارای قطر متوسط ۱۰ سانتی‌متر می‌باشند، اقدام به نصب عوامل اختلاط مکانیکی درون لوله راکتور یا نصب پره در جداره لوله نموده‌اند. استفاده از این تجهیزات موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود ولی به علت افزایش سطح موجب افت فشار ناشی از نیروی پسا تنش برشی و همچنین به علت ایجاد مانع در مسیر جریان باعث افت فشار ناشی از درگ فشاری می‌شود. بهبود انتقال حرارت از جداره به توده گاز از جنبه زیست‌محیطی نیز حائز اهمیت است، همان‌طور که می‌دانید صنعت الفین یکی از پرمصرف‌ترین صنایع از لحاظ انرژی است [۱۲]. مصرف انرژی موجب افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود بنابراین انجام پژوهشی که بتواند مشکلات فوق‌الذکر را کاهش دهد ضروری به نظر می‌رسد. زآنجا که یکی از عوامل بهبود انتقال حرارت استفاده از عوامل خارجی نظیر فین و مخلوط کننده جریان است که علیرغم بهبود انتقال حرارت موجب افزایش افت فشار می‌شوند. از دید مکانیک سیالات به عوامل کاهش افت فشار در جریان و روش‌های کاهش افت فشار پرداخته می‌شود. سپس به بررسی عوامل مؤثر بر بهبود انتقال حرارت و مطالعه روش‌های به کار برده شده در بهبود انتقال حرارت در راکتورهای شکست حرارتی می‌پردازیم. و در پایان با انجام محاسبه ضخامت لایه مرزی ویسکوز و انجام CFD به بررسی افت فشار افزایش دما و افزایش مولفه شعاعی سرعت که موجب افزایش انتقال مومنتم شعاعی و در نتیجه انتقال حرارت به مرکز لوله می‌شود می‌پردازیم.

مبانی نظری و تجربی

محققین جهت افزایش سرعت انتقال حرارت از پوسته راکتور به مخلوط گاز واکنش؛ تحقیقات وسیعی انجام داده‌اند، همان‌طور که گفته شد انتقال حرارت نقش مهمی در واکنش کراکینگ اجرا می‌کند و لذا مهندسين شیمی با الهام از روش‌های به کار برده شده در مبدل‌های حرارتی سعی در بکار بردن این فناوری‌ها در راکتور کراکینگ حرارتی دارند. میدانیم که راکتور با مبدل این تفاوت را دارد که در راکتور علاوه بر انتقال حرارت واکنش شیمیایی نیز رخ می‌دهد. در بویلرهای بخار، یکی از مشکلاتی که اتفاق می‌افتد تخریب لوله‌ها در اثر گرم شدن غیریکنواخت و بیش‌ازحد نقطای از لوله در اثر رسوب‌گذاری و پدیده میعان فیلمی آب روی جداره داخلی لوله است. برای توزیع یکنواخت حرارت درون لوله و جلوگیری از تشکیل این پدیده کارهای زیادی صورت گرفته است، یکی از این کارها قرار دادن تسمه ماریپیچ درون لوله جهت توزیع یکنواخت حرارت در کلیه بخش‌ها و جلوگیری از تشکیل میعان فیلمی روی جداره لوله هست. در مبدل‌های صفحه‌ای، صفحات موج‌دار علاوه بر افزایش سطح انتقال حرارت، موجب ایجاد اختلاط مغشوش حتی در سرعت‌های کم جریان هستند. محققین در بررسی علل تشکیل رسوب درون مبدل‌های صفحه‌ای از جنبه‌های مختلف؛ هندسی، طراحی و شرایط فرایندی مسئله را مورد بررسی قرار دادند و نتایج تحقیق منجر به ساختن مدلی برای تشکیل جرم شد. مدل تشکیل کک نسبت به زمان در راکتور کراکینگ حرارتی با الهام از تشکیل جرم در مبدل‌های حرارتی تهیه شد. در یک تحقیق ثابت شده که در لوله‌های موج‌دار با موج ماریپیچ^۶ تنش برشی

³ methanol to propylene

⁴ oxidative coupling methane

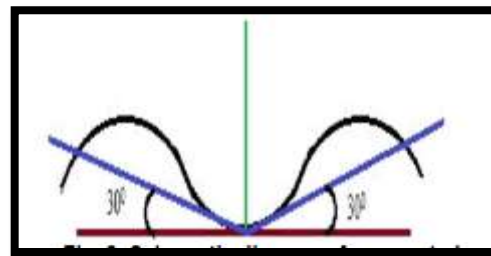
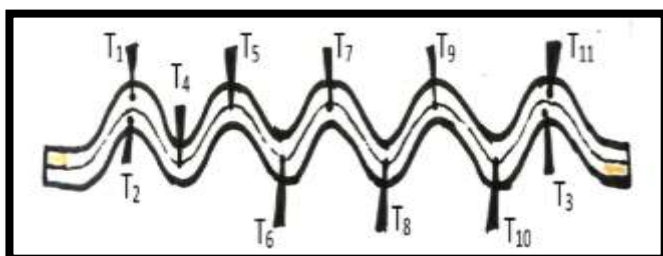
⁵ propane dehydrogenation

⁶ helical

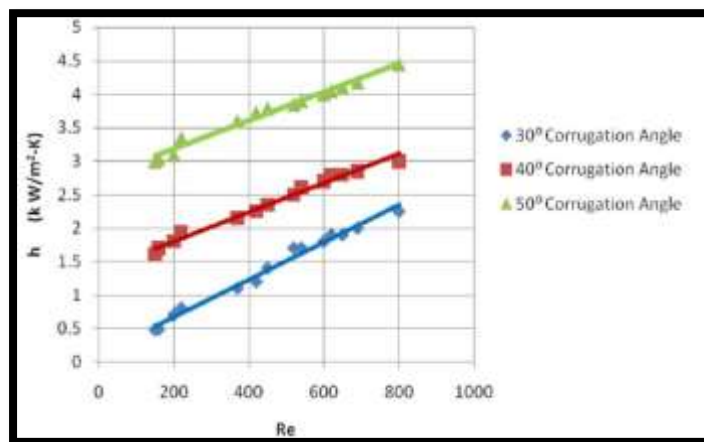


سطح، تأثیری برافت فشار ندارد. البته این نتیجه در مورد صفحات موج‌دار صدق نمی‌کند زیرا رژیم جریان در این صفحات بسیار پیچیده‌تر از لوله‌های موج‌دار است (شکل (۱)). در بررسی معادلات حاکم به این نکته باید اشاره کرد که حتی روی صفحات موج‌دار با زاویه ۶۰ درجه، جریان‌های با عدد رینولدز ۴۰۰ نیز متلاطم می‌باشند. جریان روی سطح صفحات موج‌دار کاملاً پیچیده هست به طوری که علاوه بر تلاطم، جریان چرخشی نیز داریم. یکی از محدودیت‌های استفاده از سطح موج‌دار در راکتور کراکینگ رخ دادن جدایش لایه مرزی است زیرا این پدیده ممکن است موجب گرم شدن بیش از حد سطح و تشکیل نقاط داغ شده که منجر به تشکیل کک در راکتور خواهد شد. در شرایط فوق‌الذکر استفاده از مدل‌های توربولنت DNS یا LES دقیق‌تر می‌باشند ولی به علت هزینه بالای این دو روش، می‌توان از مدل‌های $K-\omega$ یا مدل $K-\epsilon$ استفاده کرد در نهایت به علت تأیید مراجع مختلف در تحقیقات پیشین مدل $K-\epsilon$ به کار رفته است.

مبدل‌های حرارتی با صفحات موج‌دار علاوه بر سهولت تعمیر و نگهداری، از لحاظ انتقال حرارت به علت ایجاد تلاطم، نسبت به مبدل‌های پوسته و لوله بهره‌وری بیشتری دارند. همچنین زاویه شیب، بین موج‌های صفحه مبدل و جهت کلی جریان عامل اصلی تعامل میان مکانیک سیالات و انتقال حرارت در این نوع مبدل‌ها است. در مبدل‌های صفحه‌ای مرکز جریان از درون قسمت پست صفحه عبور می‌کند، در تحقیق انجام شده مشخص شد که زاویه موج ۵۰ درجه از ۴۰ و ۳۰ درجه نتایج بهتری ارائه می‌دهد در نهایت یک رابطه جدید برای محاسبه عدد (ناسلت) بر اساس عدد رینولدز، عدد (پرانتل) و زاویه موج به دست آمد رابطه جدید با نتایج محققین دیگر اعتبارسنجی شد.



شکل (۱): بررسی اندازه زاویه موج در مبدل‌های صفحه‌ای موج‌دار در اعداد رینولدز مختلف [۱۱].



شکل (۲): بررسی تأثیر عدد رینولدز بر شدت توربولنسی.

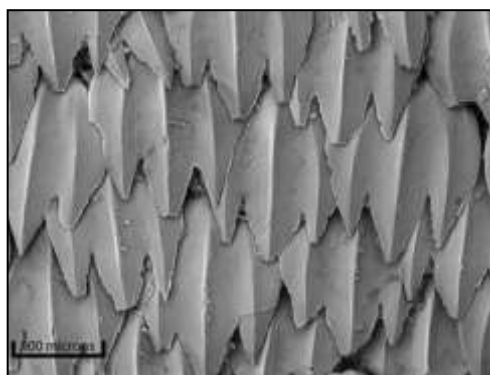


نتیجه قابل توجهی که از تحقیق فوق به دست آمد این بود که با افزایش زاویه موج عدد (ناسلت) و ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یافت. در یک تحقیق که با هدف به دست آوردن رابطه‌ای برای عدد (ناسلت) بر مبدل‌های صفحه‌ای موج‌دار با دو زاویه خمش ۳۰ و ۶۰ درجه در اعداد رینولدز ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ انجام شد، مشخص شد که با افزایش عدد (رینولدز) و زاویه خمش، عدد (ناسلت) افزایش پیدا می‌کند؛ و همچنین مشخص شد که تأثیر عدد پرانتل بر عدد ناسلت ناچیز است. رابطه به کار برده شده جهت محاسبه موج‌های ۶۰ درجه، که یک رابطه پارامتری است، به‌قرار زیر است:

$$Y=1.8(\sin(360X)) \quad (1)$$

بررسی افت فشار ناشی از ایجاد زبری مصنوعی یا موج دار کردن سطح و روشهای کاهش آن

بررسی جریان مغشوش، روی سطوح زبر، از دید مکانیک سیالات و انتقال حرارت از سوی صنایع مختلف مورد توجه است [۷]. بعضی تحقیقات جهت یافتن رابطه‌ای میان میزان زبری سطح نسبت به قطر هیدرولیک و انتقال حرارت، انجام گرفت. بعضی دیگر درصد مقایسه میان بلندی و پستی موج با میزان زبری ناشی از سند بلاست بودند. تعداد قابل توجهی از نتایج نشان می‌دهد که جریان در مرکز لوله بی‌تأثیر از میزان زبری جداره لوله هست. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان مدل $k-\epsilon$ را با دقت خوبی برای سطوح با زبری متوسط به کار برد. در نتایج تحقیقات، تأثیر عدد رینولدز بر شدت توربولنسی شکل (۲) (نسبت ریشه متوسط مربع نوسان سرعت به سرعت متوسط جریان به طوری که شدت ۱٪ یا کمتر به عنوان شدت کم و شدت بیش از ۱۰٪ شدت بالا در نظر گرفته می‌شود) نشان داده شده است، به طوری که با افزایش عدد رینولدز شدت توربولنسی کاهش می‌یابد. در تحقیقی که با الهام از پوست کوسه صورت گرفته است، مشخص شده که پولک‌های روی سطح پوست کوسه که در اندازه میکرو می‌باشند (شکل (۳)) به علت شکل خاص قادرند تا حدودی از تشکیل گردابه در سطح جلوگیری کرده و نیروی درگ ناشی از سطح را کاهش دهند. کوسه جاندار آب‌زی است که می‌تواند با سرعت زیادی در آب شنا کند، دانشمندان دریافتند که علت شنای با سرعت زیاد کوسه در زیر آب به علت صاف بودن پوست آن نیست بلکه به علت وجود پولک‌های پره دار هست. از آنجاکه تنش برشی روی بخش‌های مختلف پولک متفاوت است و در تاج پولک حداقل و در ناحیه بین دو پولک حداکثر است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که همین اختلاف مقدار تنش برشی روی سطح دلیلی است بر کم بودن تنش برشی روی سطح پولک‌دار نسبت به سطح بدون پولک. در عمل با اضافه کردن پولک به سطح، سطح افزایش داده می‌شود و عملاً انتقال حرارت افزایش خواهد یافت از طرف دیگر به علت کاهش اصطکاک افت فشار نیز نسبت به سطح صاف کاهش خواهد یافت.

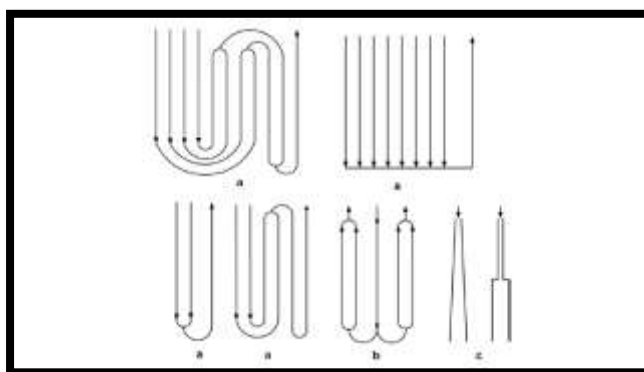


شکل (۳): نمای پولک‌های موجود روی پوست کوسه [۱۰].

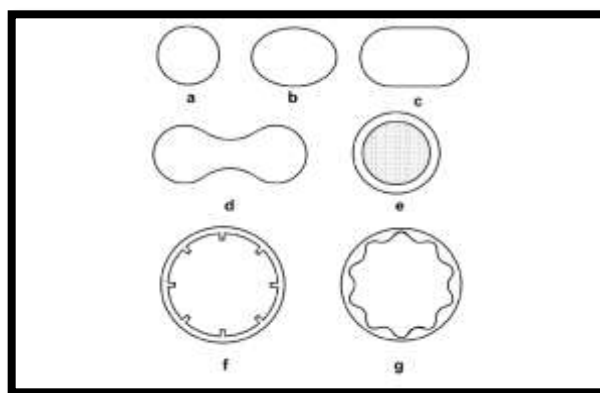


بررسی روش‌های بهبود انتقال حرارت در راکتورهای کراکینگ حرارتی

همانگونه که در مقدمه گفته شد مهندسين شيمي با الهام از روشهای بهبود انتقال حرارت به کار برده شده در مبدل‌های حرارتی جهت کاربرد مشابه در راکتورهای شیمیایی استفاده می‌کنند. در این بخش به اقدامات نوین به کاربرده شده در این زمینه می‌پردازیم. یکی از روشهای بهبود انتقال حرارت در راکتور شکست حرارتی کنترل حرارت مشعل‌ها است. در این مفهوم نسبت شار حرارتی داده‌شده به لوله‌های ورودی بیش از شار حرارتی داده‌شده به لوله‌های خروجی از راکتور است. لوله‌ها و مشعل‌ها طوری چیده شده‌اند که این کار را عملی کرده است. سیال ورودی سردتر از محصولات خروجی هست. این عمل با قرارداد مشعل‌های بیشتر در سمت ورودی امکان پذیر می‌شود. یکی از راه‌های افزایش شارحرارتی وارد به لوله راکتور افزایش نسبت سطح به حجم لوله است این کار با استفاده از لوله‌های با قطر متغیر صورت می‌گیرد یعنی لوله‌های ورودی به کوره با قطر کم و تعداد زیاد و در خروج از کوره تبدیل به لوله‌های با قطر زیاد و تعداد کم می‌شوند. یکی از راه‌های افزایش سطح به حجم در لوله راکتور کراکینگ حرارتی تغییر شکل محیطی لوله راکتور (شکل (۵)) است؛ کویل‌های با جریان بین لوله‌ای یکی از پیشنهاداتی است که توسط محققین ارائه شده است.



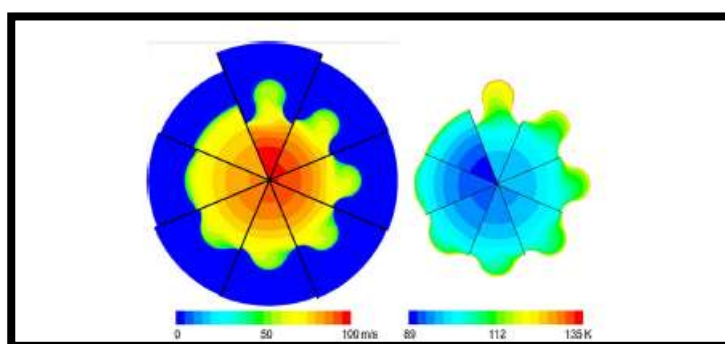
شکل (۴): انواع کویل‌های راکتورهای کراکینگ حرارتی باهدف افزایش انتقال حرارت و کاهش افت فشار
a- کویل با قطر متغیر b- کویل با قطر متغیر معکوس c- کویل با قطر افزایشی [۱۲].



شکل (۵): انواع تغییر شکل محیطی لوله‌های راکتور کراکینگ حرارتی جهت کاهش مقاومت انتقال حرارتی a- مدور b- بیضوی c- کروی توسعه داده شده d- دمبلی e- دابل پایپ (آنالس) f- فینهای هلیکال g- فینهای مستقیم طولی [۱۲].

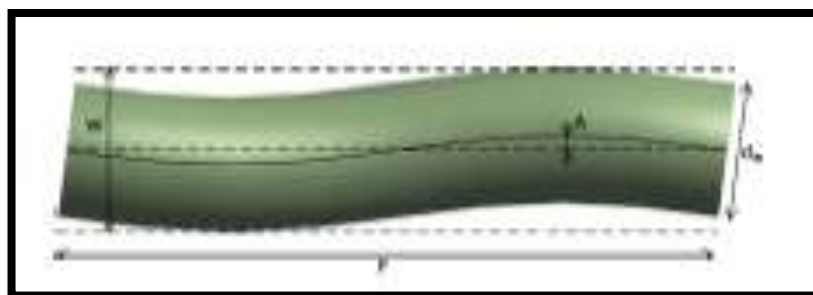


همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده نسبت سطح به حجم در این کوپل‌ها نسبت به سایر کوپل‌های گرد بیشتر است ولی به علت عدم توانایی در ذخیره‌سازی کک تشکیل‌شده در اثر واکنش سریعاً دچار گرفتگی می‌شوند. پیشنهاد دیگری که توسط محققین انجام شده است استفاده از کوپل‌های بیضوی است. کوپل‌های بیضوی نسبت سطح به حجم بیشتری نسبت به کوپل‌های مدور دارند ولی پس از مدتی فرم لوله در اثر حرارت به حالت گرد تبدیل می‌شود. راه دیگر افزایش انتقال حرارت داخل کوپل کاهش مقاومت حرارتی درون کوپل است. برای کاهش مقاومت حرارتی درون کوپل از فین استفاده می‌شود، مطابق با شکل (۶) دو نوع فین توسط محققین پیشنهاد شده است. فین‌های چرخشی و فین‌های مستقیم طولی ولی به علت افزایش افت فشار موجب کاهش انتخاب پذیری^۷ بین واکنش‌های شیمیایی در تولید اتیلن می‌شوند.



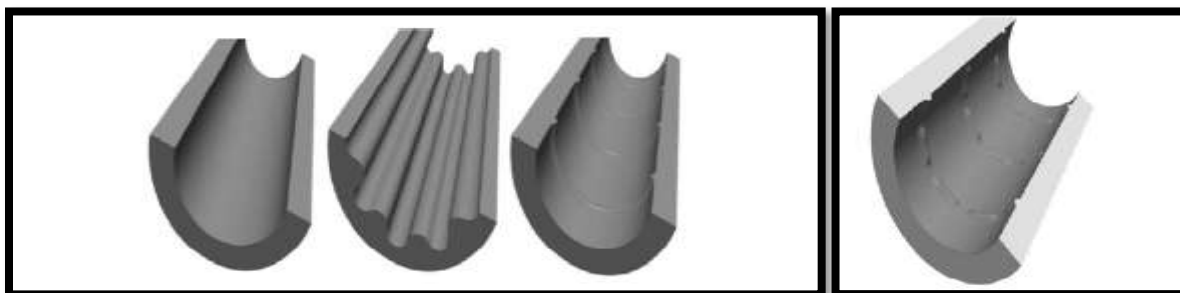
شکل (۶): نمای مقطعی از فین طولی در کوپل‌های نوین سمت راست کانتوردما [K] و سمت چپ کانتور سرعت [m/s] [۴].

کارل شیتکت و همکاران در سال ۲۰۱۳ اقدام به بررسی استفاده از فین (شکل (۸)) یا سطوح توسعه‌یافته در داخل لوله (شکل (۷)) راکتور کراکینگ حرارتی، به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی CFD نمودند. در این شبیه‌سازی هم از فین‌های زاویه‌ای (پیچ‌خورده) و هم از فین‌های طولی استفاده شد. شرایط عملیاتی از لحاظ دما و فشار همانند شرایط صنعتی تنظیم شد و همزمان با شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و انتقال حرارت شبیه‌سازی واکنش‌های شیمیایی نیز انجام شد. سپس جهت بهینه‌سازی شرایط انتقال حرارت، متغیرهای طراحی بهینه‌سازی شد (افزایش انتقال حرارت به حداکثر). نتایج نهایی نشان داد که به علت بهبود انتقال حرارت درصد کک تولیدی به میزان ۵۰٪ کاهش یافت.



شکل (۷): لوله موج دار با قطر ثابت [۱۴].

⁷ selectivity



شکل (۸): مقایسه تاثیر فین‌های طولی شعاعی و دنده ای با لوله بدون فین در راکتور کراکینگ حرارتی [۵].

این در حالی بود که به علت افزایش سطح تماس درون لوله راکتور و در نتیجه افزایش اصطکاک افت فشار به میزان $1/22$ تا $1/66$ برابر افزایش یافت. این افزایش افت فشار سبب کاهش قابل ملاحظه انتخاب پذیری در محصولات تولیدی گردید. در سال ۲۰۱۴ آقای کارل شینکت و همکاران از فناوری لوله خمیده به جای قرار دادن نوار پیچ خورده در درون راکتور استفاده کردند شکل (۶)؛ که آن را لوله با جریان مارپیچ ۸ می نامیدند. این ابتکار موجب افزایش انتقال حرارت به میزان $1/2$ تا $1/5$ برابر لوله مستقیم گردید ولی بازهم مشکل افت فشار وجود دارد و این بار $1/4$ تا $2/2$ برابر لوله مستقیم. ولی به علت افزایش انتقال حرارت دمای پوسته لوله راکتور کاهش و در نتیجه موجب کاهش تشکیل کک نیز می گردد. لازم به ذکر است که این فناوری هم‌اکنون توسط یکی از معدود دارندگان فناوری الفین یعنی تکنیپ خریداری شده و در صنعت به کار می رود. در سال ۲۰۱۷ وند وال و همکاران باهدف شبیه‌سازی دینامیک لوله راکتور کراکینگ حرارتی به کمک CFD، تغییرات جدیدی به سطح داخلی کوئل دادند و با قرار دادن برجستگی‌های دنده‌ای در نقاط مختلف در طول لوله راکتور میزان تشکیل کک و همچنین رشد کک و تاثیر آن بر سایر پارامترهای راکتور را بررسی کردند. در نتیجه قرار دادن این دنده‌ها در راکتور بازدهی بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها داشت.

استفاده از فین‌های محیطی در زیر لایه مرزی ویسکوز در لوله راکتور کراکینگ حرارتی

در این قسمت با انجام محاسبات به بررسی تاثیر زیر لایه ویسکوز بر عملکرد راکتور کراکینگ حرارتی می پردازیم همان گونه که گفته شد در راکتور کراکینگ حرارتی علاوه بر انتقال حرارت و اکنش شیمیایی نیز رخ می دهد. در اکثر تحقیقات به عمل آمده مشاهده می شود که محققین بیشتر به اختلاط ماکروسکوپی توجه دارند و به اتفاقاتی که در محل تماس لوله با سیال رخ می دهد کمتر توجه شده است، یکی از مشکلاتی که راکتور کراکینگ حرارتی با آن مواجه است تشکیل و رشد کک در محل تماس سیال هیدروکربن با جداره داخلی لوله راکتور است. رژیم جریان در لوله به علت رینولد بالا کاملاً توسعه یافته است ولی با نزدیک شدن به دیواره لوله راکتور از لایه بیرونی به لایه همپوشانی و سپس لایه بافر و در نهایت به زیر لایه ویسکوز می رسیم. شروع رشد کک در لوله راکتور نیز از همین نقطه پایان شروع می شود یعنی در زیر لایه ویسکوز. از طرفی می دانیم که مکانیزم تشکیل کک طوری است که گاز هیدروکربن در اثر حرارت بالا هیدروژن‌های خود را از دست می دهد و به هیدروکربن‌های



سنگین با ویسکوزیته بالا تبدیل می‌شود. حال اگر این عمل در نزدیکی دیواره رخ دهد که توزیع سرعت تقریباً خطی است این ترکیبات سریعاً به کک تبدیل می‌شوند. با محاسبات زیر که برای تعیین اندازه مش انجام شده است. مشخص می‌شود که ضخامت زیر لایه ویسکوز در حدود کسری از یک میلی‌متر است.

جدول (۱): مشخصات ترمودینامیکی هوا [۱۵].

T [c]	ρ [kg/m ³]	Cp [kj/kg.k]	K [w/mk]	μ [kg/ms]
800	0.4	1150	.07	4.2×10^{-5}

در راکتورهای کراکینگ حرارتی عدد رینولد بالای ۲۰۰۰۰ می‌باشد حال با فرض اینکه لوله ای به قطر ۵ سانتی متر داشته باشیم و سیال درون آن هوا با شرایط فوق الذکر باشد. خواهیم داشت [۱۶].

$$R_{ed} = \frac{\rho u_{\infty} D}{\mu} = \frac{4 \times u_{\infty} \times 0.05}{4.2 \times 10^{-5}} \quad (2)$$

$$u_{\infty} = \frac{(20000 \times 4.2 \times 10^{-5})}{(0.4 \times 0.05)} = 42 [m/s] \quad (3)$$

$$\frac{C_f}{2} = \frac{0.039}{R_d^{1/4}} = \frac{0.039}{(20000)^{1/4}} = .033 \quad (4)$$

$$\tau_w = \frac{C_f}{2} \times \rho \times u_{\infty}^2 = 0.033 \times 0.4 \times 42^2 = 23.2848 \quad (5)$$

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{23.2848}{0.4}} = 7.63 \quad (6)$$

$$y^+ \gg 1 \quad (7)$$

$$y = \frac{y^+ \mu}{u_{\tau} \rho} = \frac{1 \times 4.2 \times 10^{-5}}{7.63 \times 0.4} = 1.38 \times 10^{-5} m = 0.0138 mm \quad (8)$$

ضخامت زیرلایه مرزی ویسکوز در حد ۰/۰۱۳۸ میلی متر محاسبه شده است. از این محاسبه نتیجه می‌گیریم که برای بهبود انتقال حرارت و کاهش تشکیل کک بهتر است به جای ایجاد فین‌های ماکروسکپی که موجب افزایش افت فشار در لوله می‌شوند. می‌توان با ایجاد شیرهای محیطی در لوله راکتور به اندازه کسری از یک میلی‌متر رژیم جریان در نزدیکی دیواره را از آرام به مغشوش تبدیل کنیم. با این کار علاوه بر افزایش انتقال حرارت از دیواره به سیال از افت فشار بالا در اثر فین‌های ماکروسکپی جلوگیری شده و در اثر تغییر رژیم جریان از آرام به مغشوش از تشکیل کک در نزدیک دیواره راکتور ممانعت خواهد شد.

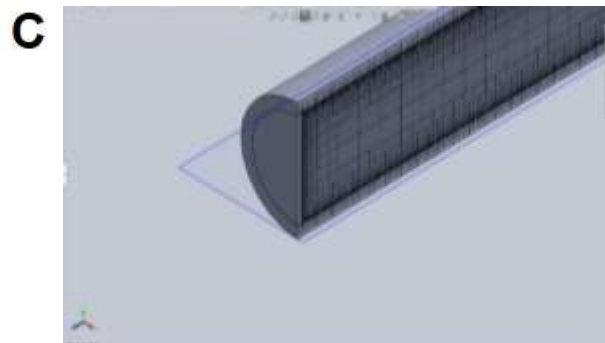
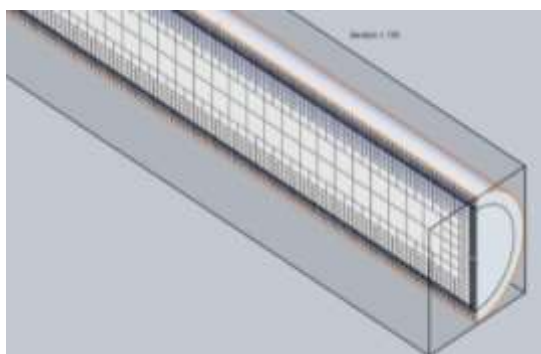
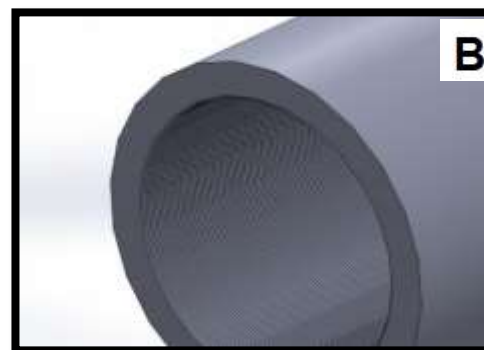
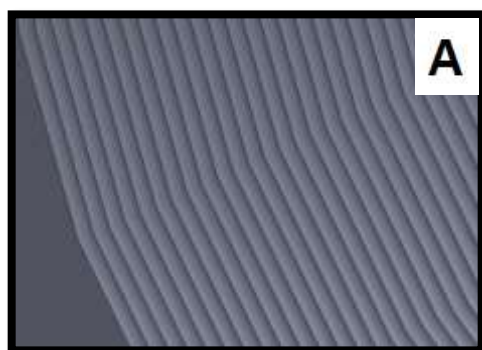


شبیه‌سازی CFD شیارهای محیطی در جداره لوله

با انجام شبیه‌سازی هیدرو دینامیکی اولیه با استفاده از الگوی فوق‌الذکر نتایج زیر حاصل شد. لوله به طول ۱۰ سانتیمتری با قطر داخلی یک سانتیمتر و سرعت سیال ورودی ۲۲ متر در ثانیه گاز اتان با دمای ۲۹۳ درجه کلوین و دمای جداره داخلی ۱۲۰۰ درجه کلوین قطر شیارها ۰/۱ میلی‌متر، شرایط عملیات در حالت پایا، مدل ویسکوزیته استفاده شده K- ϵ و روش حجم محدود^۹ با استفاده از نرم افزار سالید ورکس^{۱۰}:

جدول (۲): شماره مشخصات شبکه‌ها.

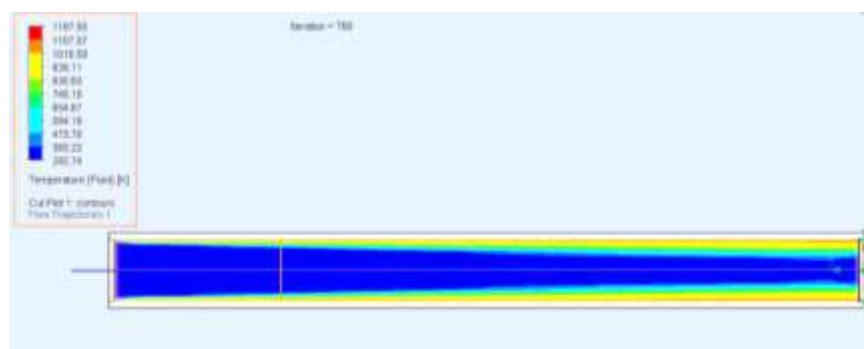
بخش / نوع لوله	تعداد سل‌های لوله سطح صاف	تعداد سل‌های لوله با شیار محیطی
کل	۱۰۷۲۳۳۵	۱۲۶۳۸۱۹
بخش سیال	۵۱۲۹۶۰	۵۹۰۰۱۸
بخش جامد	۵۵۹۳۷۵	۶۷۳۸۰۱
محل اتصال سیال جامد	۲۷۱۹۶۸	۳۴۸۱۷۴



شکل (۹): A شبکه‌های لوله شیار دار B شبکه‌های لوله صاف و C ایجاد شیارهای محیطی در جداره لوله راکتور

⁹ finite volume

¹⁰ solid works



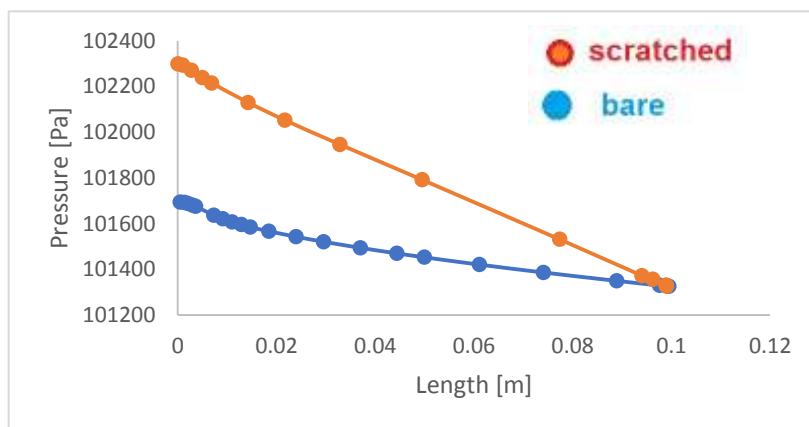
A



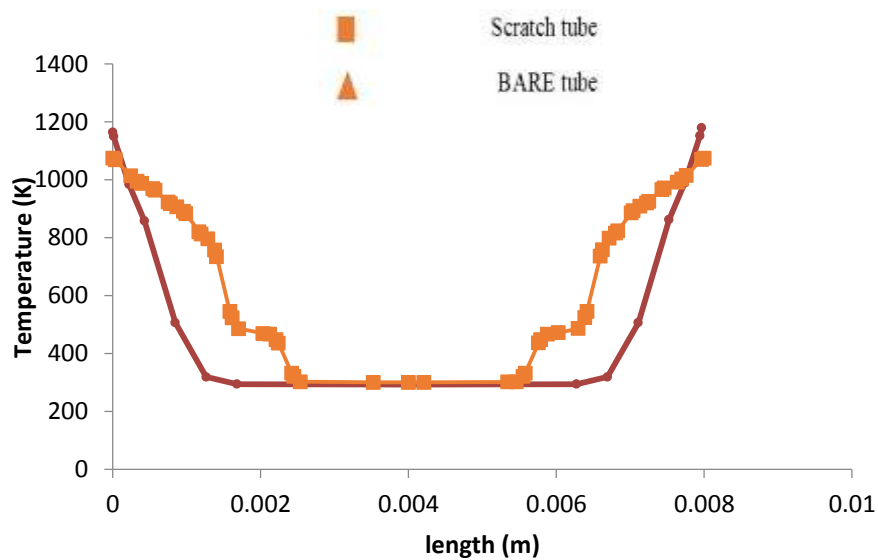
B

شکل (۱۰): کانتور دما در لوله شیاری دار A و لوله صاف B نشان داده شده است.

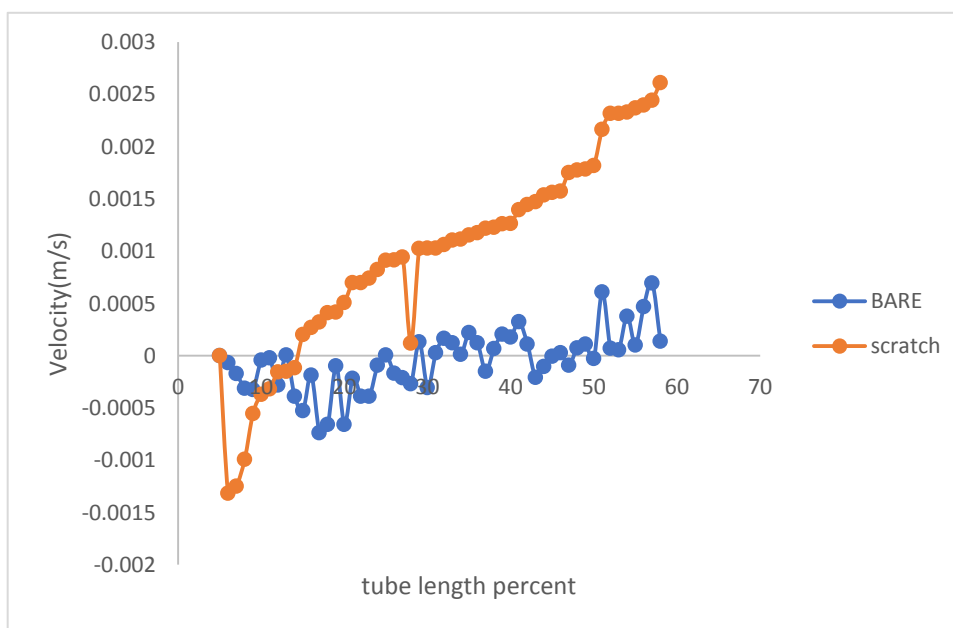
در شکل شماره (۹) نحوه شبکه بندی در نرم افزار سالیید ورک را نشان می‌دهد در این نرم افزار که از المان‌های حجم محدود استفاده می‌کند بر اساس دقت لازم و توان سخت افزار میزان خانه‌های شبکه تعیین می‌شود. جدول مشخصات شبکه را با یک کامپیوتر ۸ هسته ای نشان می‌دهد. در شکل (۱۱) توزیع فشار در طول لوله مشاهده می‌شود که وجود شیاری در جداره لوله موجب افزایش ۲ برابری افت فشار شده ولی در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود کانتورهای توزیع دما در لوله شیاری دار از دیواره به سمت مرکز لوله نسبت به لوله بدون شیاری ناحیه وسیعتری را پوشش داده است. در شکل شماره (۱۲) توزیع دما در سطح مقطع خروجی از لوله شیاری دار نسبت به لوله بدون شیاری یکنواخت‌تر است و این به دلیل افزایش مومنتم در جهت شعاع لوله می‌باشد.



شکل (۱۱): توزیع فشار در طول لوله صاف bare و لوله شیاری دار scratch.



شکل (۱۲): مقایسه توزیع دما در سطح مقطع لوله صاف و شیار دار.



شکل (۱۳): مقایسه مولفه شعاعی سرعت در لوله شیار دار و لوله صاف.

در شکل شماره (۱۳) مشاهده می‌شود که مقدار متوسط مولفه شعاعی سرعت در لوله شیاردار 0.001m/s است و در لوله صاف 0.0002m/s یعنی شیارهای جداره موجب افزایش ۱۰ برابری مولفه شعاعی سرعت است.

**نتایج:**

از مجموع مطالب فوق الذکر نتیجه می‌گیریم که ایجاد شیار محیطی در لوله موجب افزایش ۱۰ برابری سرعت شعاعی و در نتیجه مومنتم و بهبود انتقال حرارت از جداره به سمت مرکز لوله می‌شود. کانتورهای دما در لوله شیار دار نشان می‌دهد که دما نسبت به لوله بدون شیار در مساحت وسیع‌تری از سطح مقطع شعاعی لوله نفوذ کرده است. همچنین افت فشار به میزان ۲ برابر لوله صاف است که قابل پیش‌بینی است و با نتایج سایر محققان مطابقت دارد. توزیع شعاعی دما در مقطع لوله نشان می‌دهد که دما در لوله شیاردار توزیع یکنواخت‌تری نسبت به لوله بدون شیار دارد.

فهرست علائم:

CFD	دینامیک سیالات محاسباتی
u_{∞}	سرعت سیال در ناحیه مغشوش
C_f	ضریب اصطکاک از معادلات تجربی
τ_w	تنش برشی دیواره لوله
u_{τ}	سرعت ناشی از اصطکاک
y^+	شاخص بدون بعد تعیین محدوده لایه ها از دیوار در جریان
y	فاصله عمود از دیواره لوله

مراجع:

- [1] Meng, H., Liang, G., Shuguang, Z., Gang, W., & Yanbo, L., (2011), Hydrodynamics Performances in Cracking Furnace Tube with Twisted Slice: Experiments and Simulations. . in International Conference in Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring. IEEE.
- [2] Heinz Zimmermann, R.W., (2012), Ethylene, in ullmann's encyclopedia of industrial chemistry, 13. pp 66.
- [3] Ahsan, M., (2014), Numerical analysis of friction factor for a fully developed turbulent flow using k-ε turbulence model with enhanced wall treatment. . Beni-Suef University journal of basic and applied sciences. 3(4), pp 269-277.
- [4] Nagayama, G., Matsumoto, T., Fukushima, K., & Tsuruta, T., (2017), Scale effect of slip boundary condition at solid-liquid interface, Scientific Reports, p. 43125.
- [5] Fu, Y., C. Yuan, and X. Bai, (2017), Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces. . Biosurface and Biotribology, 3(1), pp 11-24.
- [6] Heynderickx, G., G. Cornelis, and G. Froment, (1992), Circumferential tube skin temperature profiles in thermal cracking coils. AIChE journal. 38(12), pp. 1905-1912.
- [7] Schietekat, C. M., Van Goethem, M. W., Van Geem, K. M., & Marin, G. B., (2014), Computational fluid dynamics-based design of finned steam cracking reactors. . AIChE Journal. 60(2): p. 794-808.
- [8] Schietekat, C. M., Van Goethem, M. W., Van Geem, K. M., & Marin, G. B., (2014), Swirl flow tube reactor technology: An experimental and computational fluid dynamics study. Chemical Engineering Journal. 238: p. 56-65.



- [9] Vandewalle, L. A., Van Cauwenberge, D. J., Dedeyne, J. N., Van Geem, K. M., & Marin, G. B., (2017) ,Dynamic simulation of fouling in steam cracking reactors using CFD. Chemical Engineering Journal. 329, pp 77-87.
- [10] Cengel, Y. (2003). Heat Transfer A Practical Approach, WCB McGraw-Hill. Ellison, New York, 609.
- [11] Bergman, T. L., Bergman, T. L., Incropera, F. P., Dewitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons