دانشکده مهندسی
گروه مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

مطالعه تجربی امکان وجود عدم تشابه رینولدز در تداخل لایه های مرزی

نگارنده:

محمد قاسمی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

استاد راهنما:

دکتر محسن کهرم

شهریور ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

تائیدیه

گواهی می‌شود که این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن به جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

دانشجو: محمد قاسمی امضاء تاریخ

استاد راهنما: دکتر محسن کهرم امضاء تاریخ

بسمه تعالی

دانشگاه فردوسی مشهد

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

جلسه دفاع از پایان نامه آقای محمد قاسمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** گرایش تبدیل انرژی در ساعت ..... روز ...../...../..... در محل **کلاس** ..... دانشکده مهندسی با حضور امضا کنندگان ذیل تشکیل گردید. پس از بررسی های لازم، هیأت داوران پایان نامه نامبرده را با نمره به عدد ..... به حروف ..... و با **درجه** ..... مورد تأیید قرار داد.

عنوان رساله

مطالعه تجربی امکان وجود عدم تشابه رینولدز در تداخل لایه های مرزی

هیئت داوران امضا

- **داور: دکتر جواد ابوالفضلی اصفهانی**

  گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- **داور و نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر مجتبی ماموریان**

  گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- **استاد راهنما: دکتر محسن کهرم**

  استاد گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- **مدیر گروه: دکتر مسعود طهانی**

  استاد گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

تقدیم به او که آموخت مرا تا بیاموزم، استاد گرامی جناب آقای دکتر کهرم

تقدیم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره ای از دریای بی کران مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم

امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

بوسه بر دستان پر مهرتان

چکیده فارسی

بسمه تعالی

مشخصات پایان نامه تحصیلی مقطع کارشناسی ارشد

دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان پایان نامه: مطالعه تجربی امکان وجود عدم تشابه رینولدز در تداخل لایه های مرزی

نام نویسنده: محمد قاسمی

نام استاد راهنما: دکتر محسن کهرم

دانشکده: مهندسی	گروه: مکانیک	**رشته تحصیلی:** تبدیل انرژی
تاریخ تصویب:		**تاریخ دفاع:**
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ● **دکتری** ○		**تعداد صفحات:** ۷۶

چکیده پایان نامه:

در این پایان‌نامه به بررسی آزمایشگاهی مقایسه‌ی مابین روند تغییرات ضرایب انتقال حرارت و پسا از طریق تحریک لایه مرزی پرداخته می‌شود. برای این منظور از یک تونل باد با سطح مقطعی با ابعاد ۳۳/۵ cm× ۲۹/۵ cm به طول ۲ m که به یک فن مکشی با دبی ۷۹۵۰ m^3/h متصل بود استفاده شد. در سطح بالایی تونل به عنوان سطح تبادل کننده‌ی حرارت توسط المنت-های رشته‌ای شار حرارتی ثابتی تولید شد و از سمت مرتبط با محیط به صورت کامل عایق‌بندی شد. مانع مربعی و مانع بهینه در فواصل عمودی ۰، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ میلی‌متری از سطح قرار گرفتند و دما در طول صفحه در نقاط مشخصی اندازه‌گیری شد. به کمک دماهای اندازه‌گیری شده و دمای محیط ضریب انتقال حرارت برای هر حالت محاسبه شد. نتایج این تحقیق نشان داده‌اند که با تغییر فاصله‌ی مانع از صفحه تا فاصله‌ی ۲ mm ضریب انتقال حرارت متوسط افزایش پیدا کرده و از آن به بعد رو به کاهش می‌گذارد تا اینکه اثر وجود مانع از بین می‌رود. مهدی قاسمی در سال ۱۳۹۰ در شرایط مشابه نیروی پسای وارد بر صفحه‌ی در حضور همین موانع را توسط لودسل اندازه‌گیری و ضریب پسا را محاسبه کرد. در نهایت تغییرات ضرایب پسا و انتقال حرارت در تداخل لایه مرزی مقایسه و وجود عدم تشابه بین انتقال حرارت و مومنتوم در لایه مرزی آشفته‌ی صفحه‌ی تخت مشاهده شد.

کلید واژه:

۱. ضریب انتقال حرارت
۲. ضریب پسا
۳. صفحه‌ی تخت
۴. مانع مربعی
۵. مانع بهینه

امضای استاد راهنما:

تاریخ:

فهرست

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ روش‌های موثر افزایش انتقال حرارت ۳

۱-۲-۱ افزایش انتقال حرارت از طریق افزایش سطح تبادل حرارت و تغییر هندسه ۳

۱-۲-۲ افزایش انتقال حرارت از طریق ایجاد مانع (تحریک لایه مرزی)..... ۴

۱-۲-۳ افزایش انتقال حرارت با استفاده از محلول‌های پلیمری..... ۷

۱-۲-۴ سایر روش‌ها ۹

۱-۳ روش‌های موثر کاهش پسا ۹

۱-۳-۱ کاهش پسا با حلال‌های پلیمری..... ۱۰

۱-۳-۲ کاهش پسا با محلول‌های پوشاننده‌ی سطح ۱۰

۱-۳-۳ کاهش پسا با پوشش‌دهنده‌های منعطف..... ۱۰

۱-۳-۴ کاهش پسا با میکروحباب‌ها..... ۱۱

۱-۳-۵ کاهش پسا با تحریک لایه مرزی ۱۲

۱-۴ پیشینه‌ای از تحریک لایه مرزی ۱۳

۱-۴-۱ تحریک لایه مرزی با موانع بدون فاصله از سطح لایه مرزی ۱۳

۱-۴-۲ تحریک لایه مرزی با موانع فاصله‌دار از سطح لایه مرزی..... ۱۷

۱-۵ هدف پایان‌نامه ۲۷

فصل دوم: معرفی بستر آزمایش و روش اندازه‌گیری

۲-۱ مقدمه ۳۰

۲-۲ تجهیزات آزمایش ۳۱
۲-۲-۱ تونل باد ۳۱
۲-۲-۲ فن مکشی و شیپوره‌ی همگرا ۳۲
۲-۲-۳ سطح انتقال حرارت شار ثابت ۳۲
۲-۲-۴ ترانس ۳۴
۲-۲-۵ دماسنج ۳۵
۲-۲-۶ آمپر- ولت‌متر کلمپی ۳۵
۲-۲-۷ موانع مربعی و بهینه ۳۵
۲-۳ روش آزمایش ۳۶
۲-۴ شرایط محیط ۳۷
۲-۵ روابط حاکم ۳۷

فصل سوم: نتایج و بررسی آن‌ها

۳-۱ مقدمه ۴۰
۳-۲ اعتبارسنجی نتایج ۴۱
۳-۳ بررسی مانع مربعی ۴۲
۳-۴ بررسی مانع بهینه ۴۷
۳-۵ مقایسه‌ی تغییرات ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک ۵۰
۳-۵-۱ مانع مربعی ۵۱
۳-۵-۲ مانع بهینه ۵۳

فصل چهارم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۴-۱ نتیجه‌گیری ۵۸
۴-۲ ارائه پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده ۵۹

منابع ۶۱

پیوست الف: داده‌های آزمایشگاهی

الف-۱ دمای نقاط طولی صفحه در حضور مانع مربعی در مرتبه‌ی اول اندازه‌گیری..... ۶۴

الف-۲ دمای نقاط طولی صفحه در حضور مانع مربعی در مرتبه‌ی دوم اندازه‌گیری ۶۷

الف-۳ دمای نقاط طولی صفحه در حضور مانع بهینه در مرتبه‌ی اول اندازه‌گیری..... ۷۰

الف-۴ دمای نقاط طولی صفحه در حضور مانع بهینه در مرتبه‌ی دوم اندازه‌گیری ۷۳

پیوست ب: داده‌های مورد استفاده از مرجع [۴۵]

ب-۱ ضریب پسای صفحه‌ی تخت بدون حضور مانع..... ۷۶

ب-۲ ضریب پسای صفحه‌ی تخت در حضور مانع بهینه..... ۷۶

ب-۳ ضریب پسای صفحه‌ی تخت در حضور مانع مربعی..... ۷۶

نمادها			
نماد	**نام فارسی**	**نام انگلیسی**	**واحد**
A	مساحت	Area	m^2
C_d	ضریب پسا	Drag Coefficient	
C_f	ضریب اصطکاک	Friction Coefficient	
D	قطر مانع	Obstacle Diameter	mm
G or d	فاصله‌ی عمودی مانع از صفحه‌ی تخت	Vertical Distance of Obstacle from the Flat Plate	mm
G/D	نسبت فاصله	Distance Ratio	
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی	Convective Heat Transfer Coefficient	$w/m^2.K$
I	جریان الکتریکی	Current	A
k	ضریب هدایت حرارتی	Conductive Heat Transfer Coefficient	$w/m^2.K$
Nu	عدد ناسلت	Nusselt Number	
Pr	عدد پرانتل	Prandtl Number	
q	گرمای تولیدی المنت‌ها	Generated Heat by Elements	J
Re	عدد رینولدز	Reylonds Number	
St	عدد استانتون	Stanton Number	
T	دما	Temperature	K
V	سرعت	Velocity	m/s
x	فاصله از ابتدای صفحه‌ی تخت	Distance from the Leading Edge of Flat Plate	cm

علائم یونانی			
نماد	**نام فارسی**	**نام انگلیسی**	**واحد**
υ	ویسکوزیته‌ی سینماتیک	Kinematic Viscosity	m^2/s
δ	ضخامت لایه مرزی	Boundary Layer Thickness	mm
زیرنویس ها			
نماد	**نام فارسی**	**نام انگلیسی**	**واحد**
cr	بحرانی	Critical	
fp	صفحه‌ی تخت بدون مانع		
i	مانع در فاصله‌ی i		
s	سطح صفحه‌ی تخت	Flat Plate Surface	
∞	محیط	Ambient	

فصل اول:

مقدمه

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه

از آنجایی که در بسیاری از مسائل مهندسی و کاربردهای صنعتی نیاز به افزایش میزان انتقال حرارت و کاهش پسا همواره مطلوب بوده و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، تحقیقات فراوانی در این زمینه‌ها انجام شده است و روش‌های گوناگونی حاصل گردیده است. روش‌های گوناگونی همچون تغییر سیال مبرد، افزایش سطح تبادل حرارت، تغییر هندسه و زبرسازی سطوح برای افزایش انتقال حرارت و روش‌هایی همچون تحریک لایه مرزی، استفاده ازحلال‌های پلیمری یا محلول‌های خاص پوشش سطح برای کاهش پسا مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

تحقیقات فراوانی بر روی تحریک لایه مرزی برای افزایش انتقال حرارت و کاهش پسا صورت گرفته است. ایجاد محرک در درون لایه مرزی سبب می‌شود که در اثر برخورد جریان با موانع، با تغییر الگوی جریان پایداری لایه مرزی از بین برود. می‌توان با قرار دادن مانع با ابعاد و فواصل متغیر در لایه مرزی، اثر پارامترهای مختلف در میزان تغییرات ضرایب انتقال حرارت و پسا در ناحیه‌ی تحریک شده را مورد بررسی قرار داد.

فصل اول این پایان‌نامه اشاره‌ی کوتاهی به روش‌های موثر و معمول در خصوص افزایش ضریب انتقال حرارت و کاهش ضریب پسا می‌کند. در ادامه برخی از کارهای انجام شده در خصوص تحریک لایه مرزی و تاثیر آن‌ها بر ضرایب انتقال حرارت و اصطکاک و مقایسه‌ی الگوی این تغییرات با هم بیان می‌گردند و در انتهای فصل نیز هدف از انجام این پروژه بیان می‌شود. فصل دوم دستگاه تونل باد آزمایش را معرفی کرده و در ادامه تجهیزات مورد استفاده، روابط حاکم، روش‌های اندازه‌گیری و پردازش داده‌ها تشریح شده است. فصل سوم به بررسی و تحلیل نتایج پرداخته و در نهایت نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادات موجود در فصل چهارم ارائه خواهند شد.

۱-۲ روش‌های موثر افزایش انتقال حرارت

برای افزایش انتقال حرارت با توجه به نوع کاربرد و شرایط جریان روش‌های گوناگونی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تعدادی از موثرترین این روش‌ها عبارتند از:

۱- افزایش انتقال حرارت از طریق افزایش سطح تبادل حرارت و تغییر هندسه

۲- افزایش انتقال حرارت از طریق ایجاد مانع (تحریک لایه مرزی)

۳- افزایش انتقال حرارت با استفاده از محلول‌های پلیمری

۱-۲-۱ افزایش انتقال حرارت از طریق افزایش سطح تبادل حرارت و تغییر هندسه

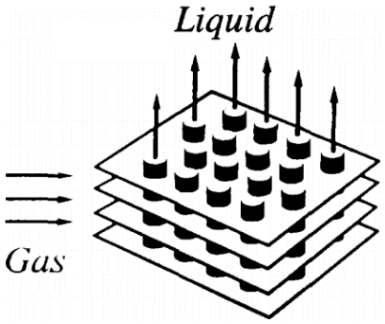
فین‌ها امکان افزایش سطح تبادل حرارتی را فراهم کرده، از طرفی باعث آشفته‌شدن جریان نیز شده و در مجموع باعث افزایش انتقال حرارت می‌شوند. در زمینه‌ی نوع فین‌ها و چگونگی قرار گرفتن آن‌ها در مبدل‌ها تحقیقات فراوانی انجام شده است. کاروینن[1] [۱] در پژوهشی تاثیر تغییر طول فین‌های مستقیم بازده فین‌های حرارتی مستقیم در مبدل‌های حرارتی را با آرایش‌های گوناگون بررسی کرده است. از طرفی استفاده از فین‌ها وابسته به شرایط و حجم در دسترس طراح بوده و در اکثر موارد با توجه به محدودیت‌های حجمی مختلفی که وجود دارد و حجم بسیاری که فین‌ها اشغال می‌کنند، نیاز به استفاده

[1] Karvinen

از شیوه‌های جدیدتری می‌باشد. استفاده از میکروفین[۱] به جای فین یا دیمپل[۲]دار کردن سطوح حرارتی از این دست می‌باشند.

۱-۲-۲ افزایش انتقال حرارت از طریق ایجاد مانع (تحریک لایه مرزی)

علاوه بر امکان افزایش سطح تبادل حرارتی می‌توان با تحریک لایه مرزی و آشفته‌کردن آن انتقال حرارت را افزایش داد. اکثر محققان از جمله فایبیگ[۳] [۲] با این استدلال که در بسیاری از انواع مبدل-های حرارتی که در آن‌ها از صفحات گسترده استفاده شده است جریان می‌تواند مانند جریان در کانال در حضور گردابه‌سازها فرض گردد، در تحقیقات خود در بحث تحریک لایه مرزی، جریان در یک کانال را مورد بررسی قرار داده‌اند (شکل۱-۱). فایبیگ در همین پژوهش به مطالعه‌ی گردابه‌های طولی و یا عرضی تولید شده توسط گردابه‌سازها پرداخت و نشان داد که گردابه‌های طولی در مقایسه با گردابه‌های عرضی درگ بیشتری تولید می‌کنند. همچنین شوبوئر[۴] و اسپنگنبرگ[۵] [۳] از گردابه‌های طولی جهت به تاخیر انداختن جدایش لایه مرزی روی بال هواپیما استفاده کردند.



شکل ۱-۱. فرض جریان درون مبدل همانند جریان درون کانال در حضور گردابه‌سازها [۲]

فایبیگ و همکاران [۴] به طور عددی جریان در کانال آرام توسعه یافته با جابجایی اجباری همراه با بالچه‌های دلتاشکل که به صورت تکی روی سطح پائین شده بودند را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج عددی نشان داد که گردابه‌ها یک سرعت عرضی هم‌مرتبه با سرعت جریان ایجاد می‌کنند. تنش متقابل گردابه‌ها

[1] Microfin
[2] Dimple
[3] Fiebig
[4] Schubauuer
[5] Spangenberg

با دیواره، سطح مقطع گردابه را از حالت دایروی به بیضوی تغییر می‌دهد و باعث پخش جفت گردابه‌ها می‌شود.

در ادامه فایبیگ و همکاران [۵] در یک پژوهش آزمایشگاهی گردابه‌سازهای بالچه دلتاشکل را به فرم تکی و جفت برای تحریک لایه مرزی در یک کانال مستطیلی قرار داده و با استفاده از ترموگرافی کریستال‌های مایع تاثیر این گردابه‌سازها را بر افزایش انتقال حرارت آزمایش کردند. در آزمایش آن‌ها انتقال حرارت محلی تا ۲۰۰٪ افزایش یافت و از بین دو گردابه‌ساز مورد استفاده، بالچه‌ی دلتاشکل تاثیر بیشتری از خود نشان داد.

در زمینه‌ی جهت چرخش گردابه‌ها نیز شیزاوا[۱] و ایتون[۲] [۶] به بررسی آزمایشگاهی یک تک‌گردابه در جریان سه بعدی آشفته پرداختند. آن‌ها نشان دادند گردابه‌های با سرعت در راستای عرض لایه مرزی پایداری بیشتری نسبت به گردابه‌های هم‌راستا با لایه‌مرزی دارند. در حقیقت این امر بیان‌کننده‌ی تاثیر مهم جهت چرخش گردابه در تقابل آن با لایه مرزی است.

محل قرارگیری گردابه‌سازها از روی سطح کانال تغییر یافت و این بار جانسون[۳] و ژوبرت[۴] [۷] جریان حول یک سیلندر دوار را که گردابه‌سازهای بالچه‌ی دلتا شکل در یک مکان با موقعیت زاویه‌ای ثابت بر روی سیلندر کار گذاشته شده بودند را بررسی کردند و افزایش ۲۰۰٪ عدد ناسلت را در محل تولید گردابه گزارش نمودند. اما در این آزمایش تغییری در ناسلت کلی مشاهده نشد زیرا با کاهش ناسلت موضعی در نقاط دیگر مواجه شدند.

در پژوهشی دیگر از سوی فایبیگ و همکاران [۸] در محدوده‌ی رینولدز ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ تغییرات انتقال حرارت جریان کاملا توسعه یافته آرام در کانال در حضور دو گردابه‌ساز بالچه‌ی دلتاشکل و بالچه‌ی مستطیلی به صورت جفت و تکی و هم‌چنین تاثیر زاویه‌ی حمله‌ی گردابه‌سازها بر درگ بررسی گردید. افزایش ضریب انتقال حرارت موضعی ۱۰۰٪ و افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط ۵۰٪ گزارش شد.

---

[1] Shizawa
[2] Eaton
[3] Johnson
[4] Joubert

مشخص گردید درگ اعمال شده توسط گردابه‌سازها به میزان زیادی وابسته به زاویه‌ی حمله‌ی آن‌ها و مستقل از عدد رینولدز یا شکل گردابه‌ساز می‌باشد.

گردابه‌هایی که تا به اینجا مورد بحث قرار گرفتند همگی به فرم بالچه‌ی دلتاشکل و مستطیلی بودند. در ادامه نتایج تحقیقات انجام شده بر روی گردابه‌سازهای دیگری مانند میکروفین‌ها، دیمپل‌ها، استوانه-های مربعی و دایروی مورد بحث قرار می‌گیرند.

دیمپل‌ها به شکل استوانه‌های توخالی ساخته می‌شوند که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. دیمپل‌ها به وسیله‌ی سوراخ‌کاری ایجاد شده در بدنه‌ی آن‌ها که دارای ابعاد و جهت‌گیری خاصی می‌باشد باعث ایجاد گردابه‌هایی شده که انتقال حرارت را افزایش می‌دهند. با کارگذاری این دیمپل‌ها افت فشار بسیار کم‌تری نسبت به هنگام استفاده از فین‌ها حاصل می‌شود. پتانسیل رسوب‌گیری آنها پایین بوده و ساخت آن‌ها نیز آسان می‌باشد.

شکل ۱-۲. آرایش سوراخ‌کاری دیمپل‌ها

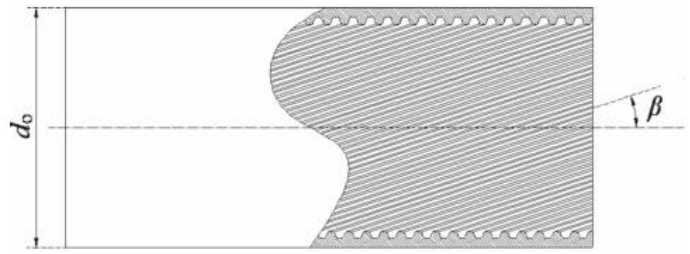
بر اساس آزمایشات چادنوفسکی[1] [۹] نسبت ارتفاع به قطر دیمپل‌ها تاثیر بسیار زیادی در میزان افزایش انتقال حرارت آن‌ها دارد. بر این اساس می‌توان دیمپل‌ها را به دو گروه کم‌عمق ($h/d < ۰/۱$) و عمیق ($h/d > ۰/۳$) تقسیم کرد. او به این نتیجه رسید که دیمپل‌ها در برخورد با دو جریان آرام و مغشوش عکس‌العمل کاملاً متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در جریان آرام جفت گردابه‌های ثابت ایجاد

[1] Chudnovsky

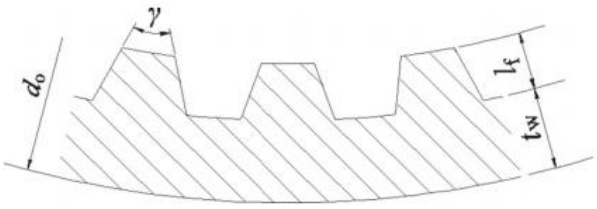
شده و افزایش انتقال حرارت مختصری ایجاد می‌شود. در حالی‌که در جریان مغشوش گردابه‌های نوسانی ستونی ایجاد می‌شوند و بر حسب عمق دیمپل‌ها نتایج زیر بدست آمد:

- دیمپل‌های کم‌عمق: موجب بیش از ۱۰۰٪ افزایش در میزان انتقال حرارت می‌شوند.
- دیمپل‌های عمیق: موجب بیش از ۲۵۰٪ افزایش در میزان انتقال حرارت می‌شوند.

امروزه اکثراً برای سرد کردن سریع‌تر سیال داخل لوله و افزایش انتقال حرارت سیال از میکروفین‌ها در بخش داخلی لوله‌ها استفاده می‌شود. شکل ۲-۳ نمایش کلی میکروفین‌های داخل لوله و نحوه‌ی آرایش آن‌ها در کنار یکدیگر را نشان داده است. جنس میکروفین‌ها اکثراً از مس و ضخامت آن‌ها ۰/۱ تا ۰/۲ میلیمتر می‌باشد. افزایش انتقال حرارت میکروفین‌ها در اثر افزایش سطح تبادل حرارتی و اختلاط سیالی که در حفره‌ی مابین فین‌ها رخ می دهد تفسیر می‌گردد.



(a) Cutaway view of the test tube



(b) Cross section of fin

شکل ۱-۳. نحوه‌ی آرایش میکروفین‌ها درون لوله‌ها [۱۰]

۱-۲-۳ افزایش انتقال حرارت با استفاده از محلول‌های پلیمری

در تمامی راه‌کارهایی که تاکنون برای افزایش انتقال حرارت مورد بحث قرار گرفتند همواره عامل نامطلوب افت فشار با عامل مطلوب افزایش انتقال حرارت همراه بوده است. از اینرو یافتن راهی جهت

کاهش افت فشار بسیار پر اهمیت می‌باشد. تامز[1] [۱۱] اثر پلیمرها یا سطح محرک‌ها در کاهش درگ را برای اولین بار بررسی کرد و مشاهده کرد که پلیمرها در مواردی که سیال مسافت طولانی طی می‌کند، در کاهش افت فشار بسیار موثر می‌باشند.

در مطالعه‌ی تجربی دیگری بر روی جریان دوبعدی کاملاً توسعه یافته در یک کانال ژو[2] و همکاران[۱۲] سطح کانال را گرم کرده و تاثیر محلول‌های سطح محرک را در غلظت‌های مختلف بر روی ضریب اصطکاک دیواره و ضریب انتقال حرارت آزمایش کردند. در این آزمایش با کاهش درگ میزان انتقال حرارت نیز کاهش یافت. نتایج کار آن‌ها در جدول ۱-۱ نشان داده شده است.

جدول ۱-۱. تاثیر غلظت محلول سطح محرک بر افزایش انتقال حرارت در آزمایش ژو [۱۲]

غلظت محلول سطح محرک (ppm)	۳۰	۷۰	۸۰	۹۰
میزان کاهش درگ	٪۷	٪۳۰	٪۵۰	٪۵۵
میزان کاهش انتقال حرارت	-	٪۱۸	٪۴۰	٪۵۵

استدلال آن‌ها بر این اساس بود که با افزایش غلظت سطح محرک عدد رینولدز بحرانی نیز افزایش یافته است.

در ادامه آن‌ها علاوه بر استفاده از محلول سطح محرک با غلظت ppm ۹۰، یک ردیف گردابه‌ساز نیز در مسیر جریان قرار داند و موفق شدند بدون اینکه میزان افت فشار نسبت به حالت بدون سطح محرک تغییر چندانی نشان دهد میزان انتقال حرارت را ٪۲۵ تا ٪۵۲ افزایش دهند. بنابراین آن‌ها توانستند بدون افت فشار انتقال حرارت را افزایش دهند.

[1] Toms
[2] Zhou

۱-۲-۴ سایر روش‌ها

یکی از جدیدترین روش‌های افزایش انتقال حرارت استفاده از تکنولوژی نانوذرات می‌باشد. بیشترین استفاده نانوذرات در بحث افزایش انتقال حرارت در میکروکانال‌ها می‌باشد. شمس و همکاران [۱۳] به کمک نانوسیال‌ها توانستند ضریب انتقال حرارت میکروکانال‌های مورد استفاده در تاسیسات صنعتی را افزایش دهند. آن‌ها به جای استفاده از سیالاتی با ضریب هدایت حرارتی بالا از نانوذرات جامد با ضریب هدایت حرارتی زیاد به صورت غوطه‌ور در سیال استفاده کردند و توانستند با استفاده از نانوذرات معلق ضریب هدایت حرارتی یک سیال را با حداقل افت فشار افزایش دهند. آن‌ها همچنین تأثیر قطر نانوذرات را بر انتقال حرارت داخل میکروکانال ها بررسی و شرایط مورد نیاز میکروکانال‌ها در ایجاد نانوسیال همگن را به دست آوردند.

۱-۳ روش‌های موثر کاهش پسا

همانطور که برای افزایش ضریب انتقال حرارت می‌توان از روش‌های گوناگونی استفاده کرد، در تحقیقاتی که در اکثر دانشگاه‌های جهان صورت گرفته است با توجه به شرایط جریان روش‌های متنوعی برای کاهش پسا مورد استفاده قرار گرفته است که برخی از آن‌ها عبارتند از:

۱- کاهش پسا با حلال‌های پلیمری

۲- کاهش پسا با محلول‌های پوشاننده‌ی سطح

۳- کاهش پسا با پوشش‌دهنده‌های منعطف

۴- کاهش پسا با میکرو حباب‌ها

۵- کاهش پسا با تحریک لایه مرزی