

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

رساله دکتری مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

بررسی تجربی تاثیر ماده متخلخل بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد آب در فضای بین دو لوله هم مرکز

نگارنده: مسعود یاراحمدی

استاد راهنما

دکتر محمد محسن شاهمردان

استاد مشاور

دکتر محسن نظری

اسفند ۱۴۰۰

تقدیم به:

پدر و مادر عزیز و مهربانم که هرچه دارم از برکت دعای خیر آنها است که
در همه حال یار و همراهم بوده اند.

مشکر و قدردانی:

در اینجا لازم میدانم از همه کسانی که این جانب را در امر انجام این پایان نامه یاری نموده اند به خصوص جناب آقای دکتر محمد محسن شاه مردان و جناب آقای دکتر محسن نظری که همواره از راهنمایی و مشاوره های آن ها بهره مند بوده ام مشکر و قدردانی نمایم.

همچنین لازم میدانم از همه دوستانی که در این مدت این جانب را یاری نموده اند، مشکر نمایم.

مسعود یار احمدی

بهمن ۱۴۰۰

تعمدنامه

اینجانب مسعود یاراحمدی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تجربی تاثیر ماده متخلخل بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد آب در فضای بین دو لوله هم مرکز تحت راهنمایی دکتر محمد محسن شاه مردان و دکتر محسن نظری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

چکیده

انتقال حرارت جوشش به خصوص جوشش جریان مادون سرد، نسبت به سایر مکانیزم‌های انتقال حرارت، به دلیل دارا بودن ضریب انتقال حرارت بالاتر در بسیاری از صنایع مانند خنک‌کاری تراشه‌های الکترونیکی و تجهیزات صنعتی کاربرد دارد. جوشش جریان مادون سرد زمانی رخ می‌دهد که دمای توده سیال کمتر و دمای سطح تماس بیشتر از دمای اشباع متناظر با فشار سیال باشد. یکی از راه‌های افزایش انتقال حرارت استفاده از فوم‌های فلزی با تخلخل بالا در کانال‌هاست که دارای نسبت سطح به حجم بالا است و منجر به افزایش تعداد مکان‌های فعال تشکیل بخار می‌شود که ناشی از افزایش سطح در معرض سیال می‌باشد و همچنین افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. در رساله‌ی حاضر با ساخت بستر آزمایشگاهی در فشار اتمسفریک در محدوده رینولدز ۳۰۰ تا ۷۰۰ در بین دو لوله هم‌مرکز عمودی با قطر داخلی و خارجی به ترتیب ۵۰/۷ و ۷۰/۶ میلی‌متر، به بررسی تجربی اثر محیط متخلخل بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد آب پرداخته شد. ماده متخلخل به کاررفته از جنس نیکل با ۱۰ppi و تخلخل ۹۵٪ است و تاثیر پارامترهایی مانند شارحرارتی در محدوده 5 kW/m^2 تا 30 kW/m^2 و دبی جرمی محدوده 0.012 kg/s تا 0.12 kg/s و دمای مادون سرد 35°C و 50°C بر ضریب انتقال حرارت جوشش جریان مادون سرد مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از آزمایش از روابط پرکاربرد ارائه شده برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت جریان تک فاز و جوشش مادون سرد در فضای بین دو لوله هم‌مرکز استفاده شد و مشخص شد این روابط با دقت خوبی می‌توانند نتایج آزمایش‌های تک فاز و جوشش مادون سرد را پیش‌بینی کنند. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که در طول تمام مراحل آزمایش انتقال حرارت از دو مکانیسم جابه‌جایی اجباری و جوشش جریانی تشکیل می‌شود که اثر هر یک از پارامترهای شارحرارتی، دبی جرمی و دمای مادون سرد ورودی بر این دو مکانیسم انتقال حرارت

مورد بررسی قرار گرفت. ضریب انتقال حرارت جوشش قویا متاثر از شار حرارت است و در یک دبی حجمی و دمای مادون سرد ورودی ثابت، ضریب انتقال حرارت جوشش با زیاد شدن شارحرارتی، افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در محدوده شارحرارتی 5 kW/m^2 تا 30 kW/m^2 ، ضریب انتقال حرارت بین $223 \text{ W/m}^2\text{k}$ تا $713 \text{ W/m}^2\text{k}$ تغییر می‌کند. افزون بر این با کاهش دبی جرمی در محدوده 0.12 kg/s تا 0.286 kg/s ، در یک شارحرارتی ثابت، ضریب انتقال حرارت تا ۳۰٪ در ناحیه جوشش مادون سرد افزایش می‌یابد، در ناحیه انتقال حرارت جوشش مادون سرد، دمای دیواره تقریباً ثابت می‌ماند و افزایش کمی در دمای دیواره اتفاق می‌افتد. بنابراین، چنانچه دبی جرمی در این ناحیه کاهش یابد، دمای بالک سیال افزایش می‌یابد در حالی که دمای دیواره تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین طبق تعریف معادله سرمایش نیوتن، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. تغییرات دمای مادون سرد ورودی سیال نیز منجر به تغییر ضریب انتقال حرارت تا ۳۵٪ می‌شود. استفاده از فوم فلزی از جنس نیکل با ۱۰ ppi و تخلخل ۹۵٪، عملکرد جوشش سطح صاف را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. با قرار دادن فوم فلزی در بین دو لوله هم مرکز عمودی، دهانه‌های کوچک بین حفره‌های فوم به سیال اجازه می‌دهد که همه حفره‌ها را پر کند که به نوبه خود منجر به افزایش تعداد مکان‌های فعال تشکیل بخار می‌شود. استفاده از فوم فلزی بطور قابل توجهی عملکرد جوشش مادون سرد در لوله را بهبود می‌بخشد و ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد در محدوده ذکر شده را حدود ۳۰ درصد افزایش می‌دهد. همچنین در رساله‌ی حاضر، بستر آزمایشگاهی به گونه‌ای طراحی شده است که امکان مشاهده پدیده جوشش مادون سرد از بیرون مجموعه آزمایشگاهی فراهم شده است.

کلمات کلیدی: انتقال حرارت جوشش، جوشش جریان‌ی مادون سرد، جوشش جریان‌ی در دو لوله هم‌مرکز، محیط متخلخل.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- جوشش استخری	۳
۳-۱- جوشش جریانی	۷
۱-۳-۱- الگوهای جریان دوفازی	۱۱
فصل دوم: مروری بر پیشینه تحقیق	۱۹
۱-۲- مقدمه	۲۰
۲-۲- پیشینه پژوهش	۲۰
۳-۲- پیشینه روابط موجود در منابع	۲۷
۴-۲- روابط منتخب در انتقال حرارت تک فاز لوله های هم مرکز	۳۲
۵-۲- روابط منتخب در انتقال حرارت جوشش جریانی برای لوله های هم مرکز عمودی	۳۳
۱-۵-۲- رابطه چن	۳۳
۲-۵-۲- رابطه جنگر و وینتون	۳۵
۳-۵-۲- رابطه لیو و وینتون	۳۶
۴-۵-۲- رابطه شاه	۳۶
۶-۲- پیشینه پژوهش استفاده از فوم های فلزی	۳۸
فصل سوم: لوازم و تجهیزات آزمایشگاهی	۴۷
۱-۳- مقدمه	۴۸

۴۸	۲-۳-نمای کلی دستگاه آزمایش
۵۱	۳-۳-تجهیزات مورد استفاده
۵۱	۳-۳-۱-بخش آزمون
۵۳	۳-۳-۲-پمپ
۵۴	۳-۳-۳-اتصالات
۵۴	۳-۳-۴-عایق حرارتی
۵۵	۳-۳-۵-سنسور دما
۵۶	۳-۳-۵-۱- سنسور دمای سیال
۵۶	۳-۳-۵-۲-سنسور دمای سطح
۵۷	۳-۳-۶-حس گر فشار
۵۸	۳-۳-۷-منبع تغذیه
۵۹	۳-۳-۸-کلمپ آمپر متر
۵۹	۳-۳-۹-پیش گرمکن
۶۰	۳-۳-۱۰-کنترل کننده دمای ورودی سیال
۶۱	۳-۳-۱۱-۱-دستگاه ثبت دما
۶۱	۳-۳-۱۱-۲-دستگاه ثبت فشار
۶۲	۳-۴-طریقه انجام آزمایش
۶۵	فصل چهارم: نتایج
۶۶	۴-۱-مقدمه
۶۶	۴-۲-شرایط آزمایش
۶۷	۴-۳-آنالیز عدم قطعیت

۴-۴-معادلات حاکم بر مسئله	۶۹
۴-۵-اعتبار سنجی نتایج	۷۲
۴-۶-نتایج حاصل از آزمایش	۷۵
۴-۶-۱- جریان جوشش مادون سرد در بین دو لوله هم محور عمودی	۷۵
۴-۶-۱-۲- تأثیر دبی جرمی بر ضریب انتقال حرارت	۸۰
۴-۶-۱-۳- روند تغییرات ضریب انتقال حرارت در شارهای حرارتی مختلف	۸۲
۴-۶-۱-۴- تأثیر دمای مادون سرد ورودی بر ضریب انتقال حرارت	۸۴
۴-۶-۲- تأثیر ماده متخلخل بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد در بین دو لوله	۸۷
فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها	۹۱
۵-۱- بحث و نتیجه گیری	۹۲
۵-۲- پیشنهادها	۹۴
مراجع	۹۵

فهرست جداول

جدول ۱-۱ - روابط مختلف در محاسبه اختلاف دما بین دیواره و دمای اشباع در زمان شروع

جوشش مادون سرد ۱۶

جدول ۱-۲: رابطه‌های انتخاب شده کیم و قجر برای انتقال حرارت جریان دوفازی [۳۶]..... ۲۸

جدول ۲-۲: ادامه رابطه‌های انتخاب شده کیم و قجر برای انتقال حرارت جریان دوفازی [۳۶] ... ۲۹

جدول ۳-۲: ادامه رابطه‌های انتخاب شده کیم و قجر برای انتقال حرارت جریان دوفازی [۳۶] ... ۳۰

جدول ۴-۲: ادامه رابطه‌های انتخاب شده کیم و قجر برای انتقال حرارت جریان دوفازی [۳۶] ... ۳۱

جدول ۱-۴: متغیرهای آزمایش ۶۷

جدول ۲-۴: مقادیر عدم قطعیت مولفه های تاثیرگذار مساله ۶۸

جدول ۳-۴: طول مادون سرد برای شرایط مختلف آزمایش ۷۱

جدول ۴-۴: مقایسه نتایج حاصل از آزمایش با رابطه شاه [۶۲] ۷۴

فهرست شکل؛

- شکل ۱-۱: وسیله گرمایش ناکیاما [۴] ۴
- شکل ۲-۱: منحنی جوشش ناکیاما برای آب اشباع در فشار اتمسفریک [۴] ۵
- شکل ۳-۱: جوشش جریان‌ی در لوله‌ی افقی با فلاکس حرارتی یکنواخت در دیواره لوله [۱] ۸
- شکل ۴-۱: نواحی جوشش جریان‌ی در لوله‌ی عمودی با فلاکس حرارتی یکنواخت در دیواره [۱] ۱۰
- شکل ۵-۱: الگوهای مختلف جوشش جریان‌ی در یک لوله عمودی [۱] ۱۳
- شکل ۱-۶-الف) نمای جانبی ب) نمای روبرو از حرکت حباب در لحظه شروع جوشش [۷۰] ۱۷
- شکل ۱-۲: نقشه جوشش جریان‌ی استقلال / وابستگی گرانش و مقایسه با مطالعه بوور [۲۷] ۲۶
- شکل ۲-۲: مرز بین جوشش مادون‌سرد پایین و بالا [۶۲] ۳۸
- شکل ۳-۲: شماتیک آزمایش شامل سیستم تامین مایع، گرمکن، کانال با مقطع مستطیلی [۷۹] ۴۰
- شکل ۴-۲: نمونه ای از فوم آلومینیومی به کار رفته [۸۰] ۴۱
- شکل ۵-۲: نمودار جوشش آزمایش‌ها در مقایسه با معادله گانگر-وینترتون [۸۱] ۴۲
- شکل ۶-۲: نمودار نسبت افت فشار β برای لوله پر شده از فوم فلزی [۸۴] ۴۳
- شکل ۱-۳: طرح شماتیک دستگاه آزمایش: ۱- مخزن آب ۲- پمپ ۳- دبی‌سنج ۴- پیش‌گرم‌کن ۵- کنترل‌کننده ۶- بخش آزمون ۷- تنظیم‌کننده ولتاژ ۸- تثبیت‌کننده ولتاژ ۹- دستگاه ثبت داده
- ۱۰- کامپیوتر جهت نمایش داده ۱۱- دوربین ۴۹
- شکل ۲-۳: الف) نمای کلی دستگاه آزمایش، ب) مخازن ذخیره آب و پیش‌گرم‌کن، ج) ست‌آپ جریان جوشش، د) محل قرارگیری دوربین و داده‌بردار ۵۰
- شکل ۳-۳: طرح شماتیک بخش آزمون ۵۲

- شکل ۳-۴: فوم فلزی به کار رفته از جنس نیکل با ۱۰ ppi و تخلخل ۹۵٪ ۵۳
- شکل ۳-۵: پمپ چرخ دنده میکرو لانگر مدل WT3000-1FB ۵۴
- شکل ۳-۶: اتصالات پلی آمید ۵۵
- شکل ۳-۷: عایق حرارتی ۵۵
- شکل ۳-۸: سنسور اندازه گیری دمای آب از نوع PT 100 پراب دار ۵۶
- شکل ۳-۹: شماتیکی از مقطع لوله و محل نصب سنسورهای نوع k ۵۷
- شکل ۳-۱۰: سنسور اندازه گیری فشار A-10 ۵۸
- شکل ۳-۱۱: منبع تغذیه الف) تنظیم کننده ولتاژ ب) ثابت کننده جریان ۵۹
- شکل ۳-۱۲: پیش گرم کن ۶۰
- شکل ۳-۱۳: کنترل کننده دمای ورودی سیال ۶۱
- شکل ۴-۱: منحنی جوشش برای دمای مادون سرد ورودی 50°C در بین دو لوله هم مرکز عمودی برای دبی جرمی 0.12 kg/s در مکان محوری ثابت $z=45 \text{ cm}$ ۷۷
- شکل ۴-۲: منحنی جوشش برای دمای مادون سرد ورودی 50°C در بین دو لوله هم مرکز عمودی برای دبی جرمی 0.2 kg/s در مکان محوری ثابت $z=45 \text{ cm}$ ۷۷
- شکل ۴-۳: منحنی جوشش برای دمای مادون سرد ورودی 50°C در بین دو لوله هم مرکز عمودی برای دبی جرمی 0.286 kg/s در مکان محوری ثابت $z=45 \text{ cm}$ ۷۸
- شکل ۴-۴: بررسی تأثیر دمای مادون سرد ورودی بر روی دمای سطح برای دبی جرمی kg/s ۷۹
- شکل ۴-۵: تغییرات ضریب انتقال حرارت برای دبی های جرمی 0.12 kg/s ، 0.2 kg/s ، 0.286 kg/s در مکان محوری ثابت $z=45 \text{ cm}$ برای مادون سرد ورودی 35°C ۸۱

- شکل ۴-۶: تغییرات ضریب انتقال حرارت برای دبی‌های جرمی 0.012 kg/s ، 0.02 kg/s ، 0.04 kg/s ۸۲
- شکل ۴-۷: تغییرات ضریب انتقال حرارت جریان برای دبی جرمی 0.02 kg/s در مکان محوری ثابت $z=45 \text{ cm}$ ۸۳
- شکل ۴-۸: اثر افزایش شارحرارتی بر رفتار حباب روی سطح در جوشش مادون‌سرد در دبی جرمی 0.02 kg/s و دمای مادون‌سرد ورودی 50°C ۸۴
- شکل ۴-۹: اثر تغییر مادون‌سرد ورودی بر ضریب انتقال حرارت برای دبی‌های جرمی الف) 0.02 kg/s ۸۶
- شکل ۴-۱۰: تاثیر استفاده از فوم فلزی نیکل بر منحنی‌های جوشش برای دمای مادون‌سرد ورودی 50°C در بین دو لوله هم مرکز عمودی برای دبی‌های جرمی 0.02 kg/s ، 0.04 kg/s ، 0.08 kg/s در مکان محوری ثابت $z=45 \text{ cm}$ ۸۸
- شکل ۴-۱۱: تاثیر استفاده از فوم فلزی نیکل بر ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون‌سرد برای 0.02 kg/s در مکان محوری ثابت $z=45 \text{ cm}$ ۸۹
- شکل ۴-۱۲: اثر استفاده از فوم فلزی بر رفتار حباب روی سطح در جوشش مادون‌سرد در دبی جرمی 0.08 kg/s و دمای مادون‌سرد ورودی 50°C ۹۰

فهرست علائم

علائم لاتین

m^2	A	سطح مقطع لوله
بدون بعد	BO	عدد جوشش
m	D	قطر لوله
$J/kg\ K$	C_p	گرمای ویژه
m	D_H	قطر هیدرولیک
$Kg/m^2\ s$	G	شار جرمی
$W/m^2\ K$	h	ضریب انتقال حرارت جابجایی
A	I	شدت جریان الکتریکی
J/kg	h_{fg}	گرمای نهان تبخیر
W/mK	K	رسانش حرارتی
m	L	طول لوله
ml/min	Q	دبی حجمی
kg/s	$\dot{m}$	دبی جرمی
بدون بعد	Nu	عدد ناسلت
بدون بعد	Pr	عدد پرانتل
Pa	P	فشار
kW/m^2	Q	شار حرارتی

W	Q_w	توان حرارتی
بدون بعد	Re	عدد رینولدز
°C	T	دما
m/s	U	سرعت
Volt	V	پتانسیل الکتریکی

علائم یونانی

Kg/m^3	ρ	چگالی
$N\ s/m^2$	μ	لزجت دینامیکی
m^2/s	ϑ	لزجت سینماتیکی
mm^2/s	α	ضریب نفوذ حرارتی
بدون بعد	x_{TT}	ضریب لاکهارت مارتینلی

زیر نویس ها

b	توده سیال (بالک)
cb	جوشش جابه جایی
nb	جوشش هسته ای
cr	بحرانی
<i>l - f</i>	مایع
z	فاصله محوری
ONB	شروع جوشش هسته ای
sat	شرایط اشباع
TP	شرایط دوفاز
g	گاز
w	سطح
i	داخلی
o	خارجی
in	ورودی
out	خروجی
sc	مادون سرد
<i>sl</i>	ظاهری مایع
sg	ظاهری گاز

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه

محدودیت منابع انرژی، بازده اقتصادی و کاربرد گسترده انتقال حرارت در صنایع مختلف سبب شده که طراحان صنعتی بالا بردن کارکرد تجهیزات گرمایی را اولویت قرار دهند. پژوهشگران همیشه به دنبال راهی برای بهبود انتقال حرارت و در نهایت افزایش راندمان حرارتی هستند. جوشش در کانال‌های افقی و عمودی تحت شرایط طبیعی یا اجباری موضوع بسیار مهمی می‌باشد. طراحی بویلرها، وسایل تبرید، خنک‌کاری تجهیزات راکتورهای هسته‌ای، سردکردن تجهیزات الکتریکی، اواپراتورها و بسیاری از وسایل مهم دیگر در نیروگاه‌ها و صنایع شیمیایی و الکترونیکی وابسته به علم مکانیک سیالات و روندهای انتقال حرارت که در جریان جوشش اتفاق می‌افتد، از کاربردهای این علم است. به تبخیر در فصل مشترک جامد-مایع، زمانی که دمای سطح از دمای اشباع متناظر با فشار مایع بالاتر رود، انتقال حرارت جوشش اتفاق می‌افتد. به دلیل بالا بودن ضریب انتقال حرارت در طی فرآیند جوشش، این فرآیند حرارت بالایی را از سیستم دفع می‌کند. جریان جوششی را براساس دمای سیال به جوشش جریان‌ی اشباع و جوشش جریان‌ی زیراشباع تقسیم می‌شود. اگر دمای توده سیال کمتر و دمای سطح تماس بیشتر از دمای اشباع متناظر با فشار سیال باشد، فرایند جوشش را جوشش مادون‌سرد میدانیم [۱]. انتقال حرارت جوشش مخصوصاً جوشش جریان‌ی مادون‌سرد به دلیل دارا بودن ضریب انتقال حرارت بالا و پایین بودن مقدار دمای مافوق‌گرم دیواره، ازجمله مکانیزم‌های اساسی در سردکردن تجهیزات است. بالاترین شار حرارتی که می‌توان به سیستم وارد کرد بدون وارد کردن آسیب به سیستم را شار حرارتی بحرانی (CHF) می‌گوییم. نتایج تحقیقات تایید شده، نشان می‌دهد که بازده انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی (CHF) جوشش جریان‌ی مادون‌سرد نسبت به جوشش جریان‌ی اشباع دارای راندمان بهتری است [۲-۴]. تحقیقات اولیه، در دهه ۶۰ میلادی، مرتبط با موضوع پدیده جوشش منتج به شناسایی پارامترهای مؤثر بر راندمان حرارتی پدیده جوشش، اعم از فشار، جنس سیال، نسبت گازهای محلول، شار حرارتی، مادون‌سردی سیال و وضعیت سطح شد [۳].

یکی از راه‌های افزایش مکانیسم انتقال حرارت استفاده از فوم‌های فلزی با تخلخل بالا در کانال‌هاست، افزایش انتقال حرارت با استفاده از محیط متخلخل به دلیل افزایش مساحت انتقال حرارت، افزایش مکان‌های هسته‌زایی حباب، ایجاد نیروی موینگی کمک‌رسان به مایع برای رسیدن به سطح گرم‌کن، فرار بخار از محیط متخلخل، افزایش سطح میکرولولایه‌های نازک تبخیری و غیره است. این آثار وابسته به خاصیت ترموفیزیکی مایع و جامد و پارامترهای محیط متخلخل مانند مقدار تخلخل، اندازه حفره‌ها و نحوه پراکندگی آن‌ها و ضخامت لایه متخلخل و غیره دارد [۹۲]. با توجه به سرعت مایعی که از روی سطح گرم‌کن گذر می‌کند، پدیده جوشش را می‌توان به دو گروه اصلی جوشش استخری^۱ و جوشش جریان^۲ منشعب شود. در جوشش استخری سیال ساکن می‌باشد درحالی‌که حرکت مایع در جوشش جریان^۲ به وسیله عوامل بیرونی مانند پمپ بر روی سطح گرم‌کن به وجود می‌آید. در تقسیم‌بندی دیگر بر اساس دمای مایع، جوشش به دو گروه جوشش زیراشباع و جوشش اشباع تقسیم شده است. اگر دمای توده سیال کمتر و دمای سطح تماس بیشتر از دمای اشباع متناظر با فشار سیال باشد، فرایند جوشش را جوشش مادون‌سرد میدانیم. جریان جوششی را براساس دمای سیال به جوشش جریان^۲ اشباع و جوشش جریان^۲ زیراشباع تقسیم می‌شود. در فرآیند جوشش، گرما از سطح گرم‌کن به لایه سوپرهیت متصل به سطح منتقل و سپس قسمت زیادی از این انرژی به صورت گرمای نهان به حباب‌ها منتقل می‌شود. میزان انرژی مانده به صورت جابه‌جایی تک‌فازی به مایع می‌رسد.

۱-۲- جوشش استخری

در جوشش استخری مایع ساکن است و حرکت آن در نزدیکی سطح جامد ناشی از دو اثر می‌باشد: جابه‌جایی آزاد و رشد و جدایی حباب‌ها در سطح جامد. اگر دمای سیال برابر با دمای اشباع باشد،

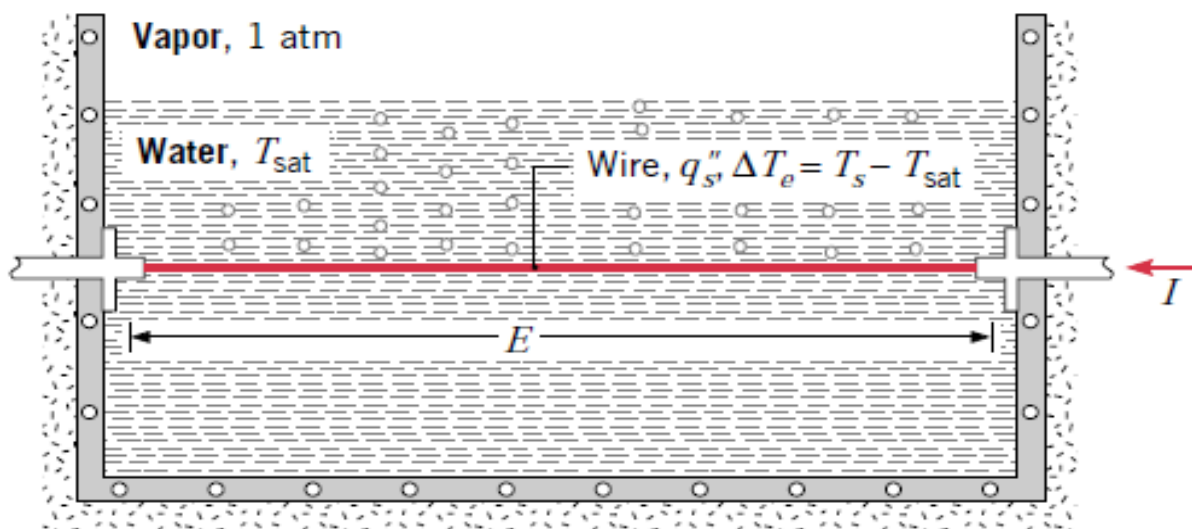
¹Pool boiling

²Flowboiling

جوشش استخري را اشباع و اگر دمای سیال پایین‌تر از دمای اشباع باشد، جوشش استخري مادون سرد گویند. جوشش استخري نقطه شروع بحث انتقال گرما در سیستم‌های جوششی است. رفتار جوشش استخري سیال به‌وسیله معادله اختلاف دما به شکل (دمای مازاد ΔT) زیر بیان شده است:

$$\Delta T = T_w - T_{sat} \quad (1-1)$$

که T_{sat} دمای اشباع سیال می‌باشد. در جوشش استخري فلاکس حرارتی وابسته به اختلاف دماهای سطح و اشباع سیال است. شکل ۱-۱، شماتیکی از دستگاه آزمایش ناکیاما می‌باشد.

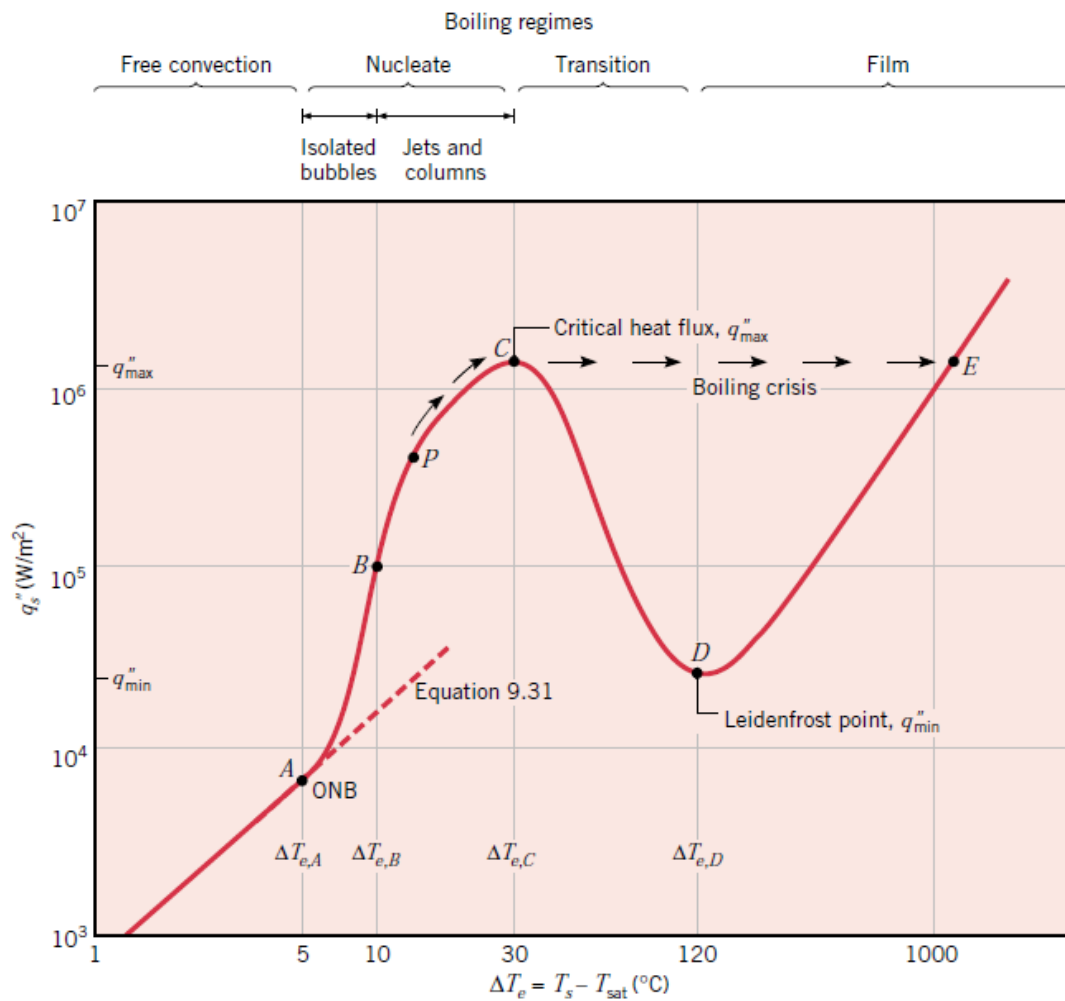


شکل ۱-۱: وسیله گرمایش ناکیاما [۴]

ناکیاما در سال ۱۹۳۴ منحنی جوشش را ارائه داد که در آن شارحرارتی نسبت به دمای سوپرهیت برای جوشش روی سطح افقی غوطه‌ور در مایع رسم شده است، همانطور که دیده می‌شود رژیم‌های متفاوت جوشش استخري با تغییر دمای سوپرهیت به‌وجود می‌آید. شکل ۱-۲، منحنی ناکیاما را برای آب اشباع در فشار اتمسفریک نشان می‌دهد. در محدوده دمای مازاد کمتر از 5°C که مربوط به ناحیه جوشش جابجایی آزاد می‌باشد، کمترین شارحرارتی را داریم. محدوده $30^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 5^{\circ}\text{C}$ را ناحیه

¹Superheat Temperature

جوشش هسته‌ای^۱ و منطقه گذر از جوشش هسته‌ای^۲ می‌باشد [۴].



شکل ۱-۲: منحنی جوشش ناکیاما برای آب اشباع در فشار اتمسفریک [۴]

در ناحیه خطی ($\Delta T \leq 5^\circ\text{C}$) که در نمودار مشخص شده، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد، مکانیسم گرمایی این ناحیه است و حبابی تشکیل نشده است و گرما توسط جابه‌جایی آزاد بین سطح گرم و سیال منتقل می‌شود. همانطور که در شکل مشخص شده است در نقطه A که آن را نقطه‌ی شروع جوشش هسته‌ای (ONB)^۳ گفته می‌شود با افزایش دمای سوپرهیت در این منطقه تشکیل حباب

¹Nucleate Boiling

²Transition Boiling

³ Onset of nucleate boiling

شروع می‌شود و شیب نمودار افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده جوشش هسته‌ای است. نواحی متمایز A - B و B - C را می‌توان در ناحیه جوشش هسته‌ای مشاهده کرد. در ناحیه A - B حباب‌ها بطور مجزا روی سطح به وجود می‌آیند و از سطح جدا می‌شوند. نتیجه جدایش حباب‌ها، افزایش اختلاط مایع و در نتیجه افزایش شارحرارتی است. در این ناحیه انتقال گرمای جابجایی بین سطح و مایع سهم بیشتر را دارد و حباب‌های جدا شده از سطح، سهم ناچیزی در انتقال گرما دارند. در منطقه B - C با افزایش دمای سوپرهیت نقطه‌های هسته‌زایی بیشتری فعال می‌شود و موجب تولید حباب‌های بیشتری می‌شود. در این منطقه با اتصال حباب‌هایی که از سطح جدا شده‌اند، شکل‌های نامنظم تشکیل می‌شود. اتصال حباب‌های جدا شده از سطح باعث اغتشاش جریان سیال در نزدیکی سطح می‌شوند. نقطه‌ی عطف منحنی جوشش در نقطه‌ی P اتفاق می‌افتد. ضریب انتقال گرما بعد از نقطه‌ی P کاهش یافته اما شار گرمایی به دلیل افزایش دمای سوپرهیت، افزایش یافته است. با افزایش شارحرارتی، حباب‌های جدا شده ستون‌هایی در نزدیکی سطح تشکیل می‌دهند و با ادامه این روند اثر تقابل ستون‌های حباب و مایع طوری است که دیگر مایع نمی‌تواند با سطح گرم در تماس باشد و از تر شدن سطح به وسیله مایع جلوگیری می‌شود که در این حالت گفته می‌شود که شارحرارتی بحرانی (CHF)^۱ اتفاق می‌افتد. شارحرارتی متناظر با نقطه C به عنوان شارحرارتی بحرانی شناخته شده است و نشان‌دهنده‌ی حد بالای شارحرارتی برای داشتن عملیات امن می‌باشد. ضریب انتقال حرارت در شارحرارتی بحرانی افت شدیدی پیدا می‌کند و دمای سطح افزایش چشم‌گیری می‌یابد که ممکن است منجر به ذوب شدن سطح می‌شود. در واقع شارحرارتی بحرانی بیشترین مقدار شارحرارتی است که در وسایل حرارتی می‌توان استفاده کرد بدون آنکه به سطح گرمایی آسیب وارد شود [۴].

منطقه جوشش هسته‌ای دارای بیشترین ضریب انتقال حرارت جوشش جابه‌جایی می‌باشد و بیشترین مقدار ضریب انتقال گرما در نقطه‌ی P می‌باشد. در منطقه جوشش هسته‌ای، شیب منحنی بسیار

^۱ Critical heat flux

بالاست. بنابراین در این منطقه به ازای دمای سوپرهیت کم، نرخ انتقال گرما زیاد است. به همین دلیل سعی می‌شود مبدل‌های حرارتی به طور معمول در ناحیه‌ی جوشش هسته‌ای کار کنند [۴].

منطقه C-D، $(30^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 120^{\circ}\text{C})$ ، منطقه گذار است. جوشش انتقالی در این منطقه روی می‌دهد. تشکیل حباب در این منطقه آنقدر سریع است که لایه پایداری از بخار روی سطح شکل می‌گیرد. در این منطقه به دلیل پایین بودن ضریب انتقال حرارت هدایت بخار نسبت به مایع، با افزایش دمای سوپرهیت، ضریب انتقال حرارت و شارحرارتی کاهش می‌یابد [۴].

در $(\Delta T \geq 120^{\circ}\text{C})$ جوشش فیلمی اتفاق می‌افتد. نقطه D را نقطه لیدن فراست^۱ گویند، شارحرارتی کمترین مقدار خود را دارد و سطح جامد از بخار پوشیده می‌شود. مکانیسم‌های هدایتی و تابشی موجب انتقال حرارت از سطح جامد می‌شود. با بالا رفتن دمای سطح جامد، انتقال حرارت تابشی از سطح به سیال افزایش می‌یابد و شارحرارتی با افزایش دمای سوپرهیت افزایش می‌یابد [۴].

۳-۱- جوشش جریانی

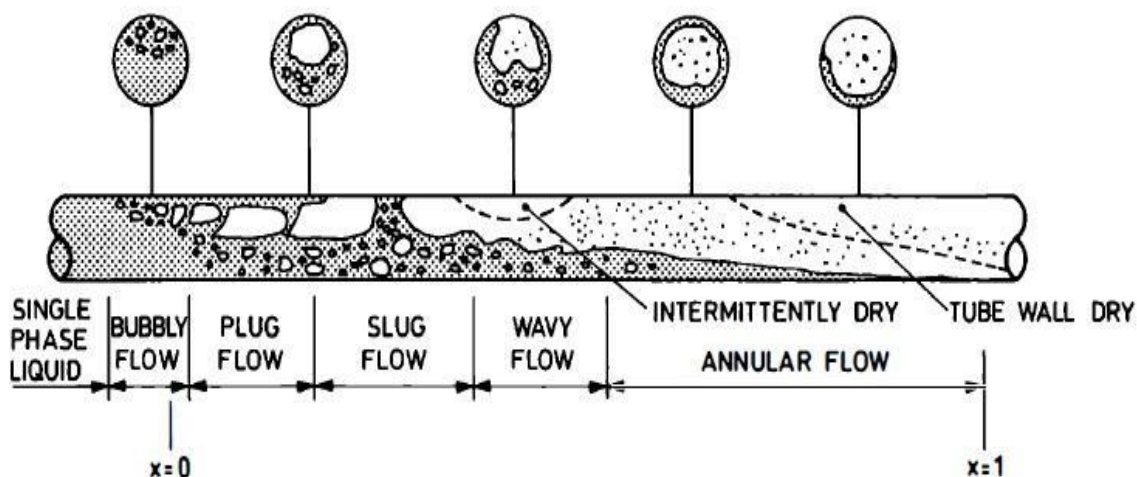
در جوشش جریانی، سیال در حال حرکت بوده و حرکت سیال ممکن است توسط عوامل خارجی مانند پمپ به وجود آید. جوشش جریانی شامل جوشش جریانی اشباع و جوشش جریانی مادون سرد^۲ است. اگر دمای سیال کمتر از دمای اشباع آن باشد، فرآیند جوشش را جوشش جریانی مادون سرد و اگر دمای سیال برابر با دمای اشباع آن باشد جوشش جریانی اشباع می‌باشد. در پروسه جوشش جریانی، انرژی ابتدا از سطح گرم به لایه مافوق گرم چسبیده به سطح منتقل می‌شود. انتقال حرارت کلی از سطح به سیال از سه مؤلفه تشکیل می‌شود: گرمای نهان که توسط حباب‌ها گرفته می‌شود، هدایت گذرا در زمانی که حباب از سطح جدا می‌شود، و جابه‌جایی تک فازی در جاهایی که حباب

¹ Leidenfrost point

² Subcooled flow boiling

وجود ندارد. بیشترین انتقال حرارت توسط گرمای نهان حباب‌ها می‌باشد بنابراین حباب‌ها نقش مهمی در انتقال حرارت جوشش جریانی ایفا می‌کنند.

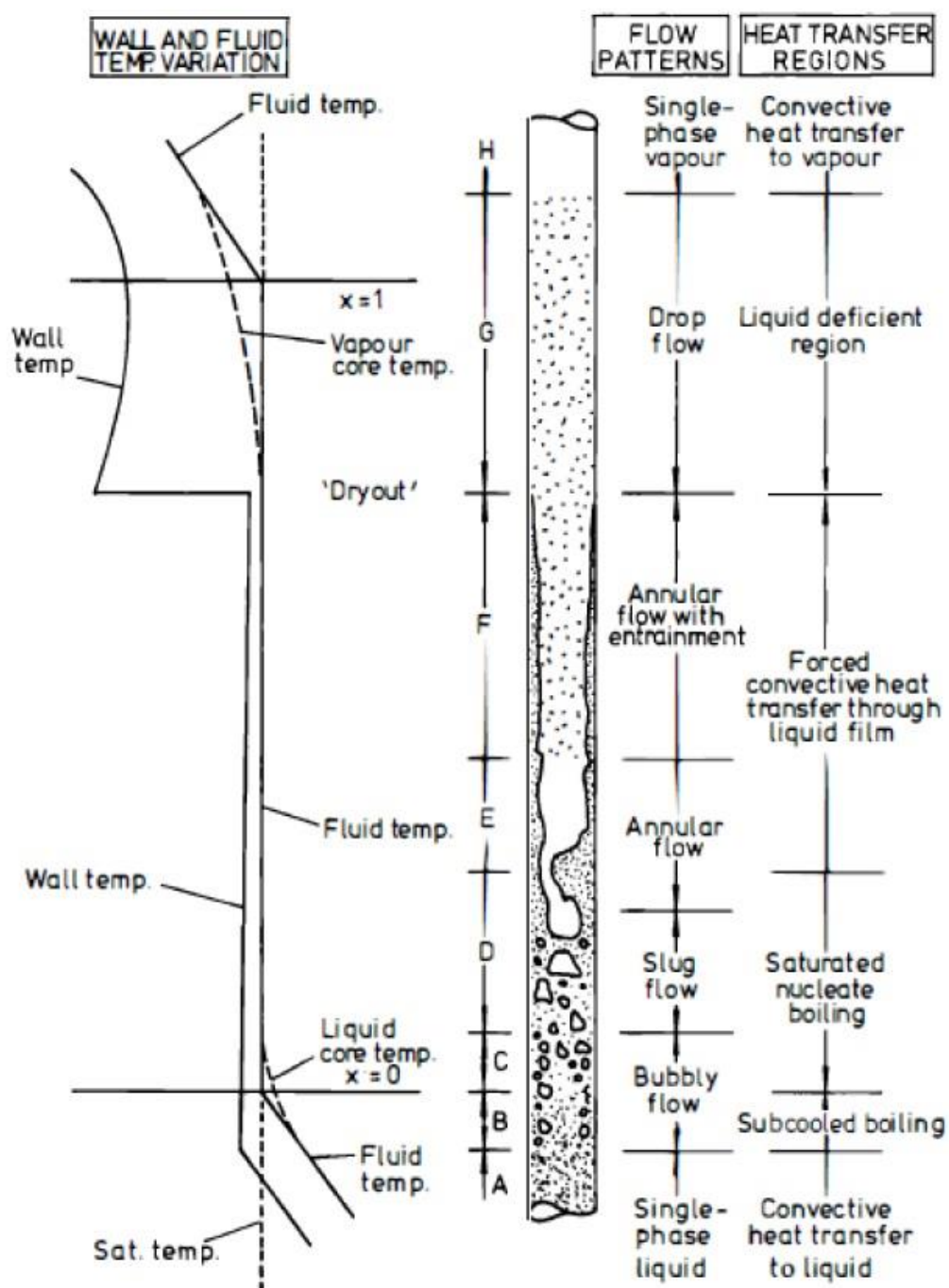
در جوشش جریانی مکانیسم‌های اصلی به‌خاطر اضافه و ادغام شدن بخار در مسیر جریان و شکل‌گیری الگوهای مختلفی پیچیده‌تر هستند و جریان بخار- مایع دچار تغییر می‌شود، اما منحنی جوشش به‌مانند جوشش استخری به دست می‌آید. در شکل ۳-۱ شماتیکی از الگوهای جریان جوشش جریانی در لوله‌ای افقی که سیال به صورت مادون سرد وارد شده و با شرط مرزی فلاکس حرارتی یکنواخت در دیواره لوله را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۳-۱: جوشش جریانی در لوله‌ای افقی با فلاکس حرارتی یکنواخت در دیواره لوله [۱]
در شکل ۴-۱ فرایند جوشش جریانی همراه با پروفایل‌های دمایی مایع و دیواره با شرایط مرزی شارحرارتی یکنواخت در لوله‌ای عمودی آورده شده است، مایع با شرایط مادون‌سرد وارد لوله شده و اولین مکانیسم انتقال حرارت، جابجایی تک‌فاز می‌باشد که دمای مایع و دیواره کمتر از دمای اشباع مایع در فشار متناظر با آن می‌باشند. در این ناحیه تغییرات دما مایع و دیواره بصورت خطی و اختلاف دمای آن‌ها ثابت است و در نتیجه در این ناحیه مقدار ضریب انتقال حرارت ثابت می‌باشد. باید گفت که تا زمانی که دمای دیواره کمتر از دمای اشباع مایع هست جوشش رخ نمی‌دهد. در نقطه‌ای از لوله،

شرایط مجاور دیوار طوری است که در محل‌هایی هسته بخار می‌تواند تولید شود. تولید بخار اولیه در حضور مایع زیراشباع (ناحیه B) اتفاق می‌افتد و مکانیزم انتقال حرارت بعنوان جوشش هسته‌ای زیراشباع معروف است. در ناحیه جوشش زیراشباع، B، اساساً دمای دیوار چند درجه بالای دمای اشباع ثابت باقی می‌ماند در حالی که دمای متوسط بالک سیال بطرف دمای اشباع افزایش می‌یابد. گذر بین نواحی جوشش هسته‌ای زیراشباع و جوشش هسته‌ای اشباع از نقطه نظر ترمودینامیکی تعریف می‌شود. ناحیه گذر محلی است که مایع به دمای اشباع می‌رسد و براساس محاسبات ساده تعادلی بدست می‌آید. در نواحی C تا G متغییر تعیین کننده مکانیزم انتقال حرارت، کیفیت جرمی ترمودینامیکی^۱ سیال است. نسبت نرخ جریان جرمی بخار به نرخ جریان جرمی کل را کیفیت جرمی ترمودینامیکی گویند. وقتی در ناحیه جوشش اشباع کیفیت ترمودینامیکی افزایش می‌یابد به نقطه‌ای خواهیم رسید که فرایند جوشش رخ نمی‌دهد، چون تشکیل هسته بکلی حذف می‌شود. این حالت گذار بدنبال تغییر الگو جریان از حبابی یا اسلاگ به جریان انیولار خواهد بود [۱].

¹Vapor quality



شکل ۴-۱: نواحی جوشش جریانی در لوله‌ی عمودی با فلاکس حرارتی یکنواخت در دیواره [۱]

با مقدار کیفیت ترمودینامیکی بحرانی تبخیر کامل فیلم مایع اتفاق می‌افتد. این حالت گذرا را حالت خشک‌شدگی^۱ می‌نامند و با افزایش دمای دیوار و تحت یک فلاکس حرارتی کنترل شده همراه است، این پدیده در طراحی اواپراتورها، لوله های فولادی، بویلرها و راکتورهای هسته‌ای و دیگر واحدهایی که با جوشش جریانی خنک می‌شوند فوق العاده اهمیت دارد. ناحیه بین خشک‌شدگی و و حالت گذرا به بخار اشباع خشک (ناحیه H) ناحیه کمبود مایع نامیده می‌شود[۱].

۱-۳-۱- الگوهای جریان دوفازی

آنالیز جریان تک‌فاز با برقرار شدن جریان آرام یا مغشوش ساده‌تر می‌شود. این اطلاعات در مطالعه جریان دوفازی نیز مفید است اما در جریان دوفازی، هندسه جریان اهمیت بیشتری دارد. زمانی که مایع در یک کانال تحت حرارت بخار می‌شود، مایع و بخار اشکال متفاوتی بخود می‌گیرند که به الگوی جریان معروف است. الگوی جریان بستگی به شرایط فشار، جریان، شارحرارتی و شکل هندسی کانال دارد. هر کدام دارای نام خاصی هستند و در طراحی مبدل حرارتی که چه الگوی جریان یا الگوهای جریان متوالی وجود دارند مورد توجه است تا بتوان یک تئوری هیدرودینامیک یا انتقال حرارت مناسب با آن الگو را انتخاب نمود. روش‌های مختلفی برای مطالعه الگوهای جریان دوفاز در کانال‌های تحت حرارت و بدون حرارت وجود دارد. در کانال‌های شفاف و با سرعت کم تشخیص الگوی جریان مستقیماً با مشاهده عینی امکان‌پذیر است. در سرعت‌های زیادتر که الگوی جریان نامشخص می‌شود از فلاش و عکاسی می‌توان برای آهسته کردن جریان و توسعه دامنه آن استفاده نمود. با وجود این، انعکاس و انکسار در فصل مشترک‌های مختلف اغلب موجب شک و تردید زیاد در تعبیر عکس‌ها و مشاهدات عینی می‌شود، این مسئله خصوصاً در سرعت‌های بالا صادق است.

¹ Dry out

در شکل ۱-۴ ناحیه‌های جوشش جریانی در لوله عمودی تحت فلاکس گرمایی یکنواخت از لحظه ورود سیال به داخل لوله تا زمان تشکیل الگوی بخار کامل مشاهده می‌شود [۱]. این تغییر الگوهای جریان در حالت ایده‌آل می‌باشد و ممکن است برخی از الگوهای جریان تشکیل نشوند و در شرایط خاص، الگوهای جریان دیگری تشکیل شوند.

مشخصه اصلی در تعیین الگوی جریان، عکس العمل‌هایی است که بین فازها رخ می‌دهد و بسته به تعریفی که در این زمینه وجود دارد، الگوهای مختلفی برای جریان دو فازی رو به بالا ارائه می‌شود [۱]. همان‌طور که در شکل ۱-۴ در ناحیه ابتدایی، جریان تک‌فاز و تا درجه حرارت اشباع در حال گرم شدن است. یک لایه مرزی حرارتی مجاور دیوار و یک پروفیل درجه حرارت شعاعی شکل می‌گیرد. در فاصله‌ای از ابتدای لوله درجه حرارت دیوار بیشتر از درجه حرارت اشباع خواهد بود و شرایط تشکیل بخار روی دیوار فراهم می‌شود. بخار در محل‌های بخصوصی روی سطح شکل می‌گیرد. حبابهای بخار بعد از بزرگ شدن و جداسدن در این محل‌ها رژیم حبابی^۱ را بوجود می‌آورند. با تولید بیشتر بخار، تعداد حباب‌ها و تداخل آنها در طول لوله برای تشکیل رژیم‌های گلوله‌ای^۲، پشته‌ای^۳ و سپس تبدیلی به رژیم حلقوی^۴ فراهم می‌شود و سپس جریان حلقوی با قطرات پراکنده^۵ ایجاد می‌شود. در ادامه تولید بخار روی دیوار متوقف می‌شود و تولید بخار بعث تبخیر مایع در فصل مشترک مایع-بخار آغاز می‌شود. سرعت‌های افزایشی هسته بخار باعث جداسدن قطرات مایع از سطح فیلم مایع می‌شود. تهی شدن فیلم مایع توسط تشکیل قطرات و تبخیر آنها باعث خشک شدن کامل مایع خواهد شد. قطرات کم‌کم تبخیر می‌شوند و به یک جریان تک‌فاز بخار تبدیل می‌شوند. در ادامه با کمک شکل ۱-۴ و ۱-۵ رژیم‌ها و ناحیه‌های جریان جوشش در لوله عمودی تحت حرارت یکنواخت را توضیح می‌دهیم.

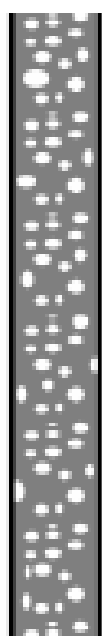
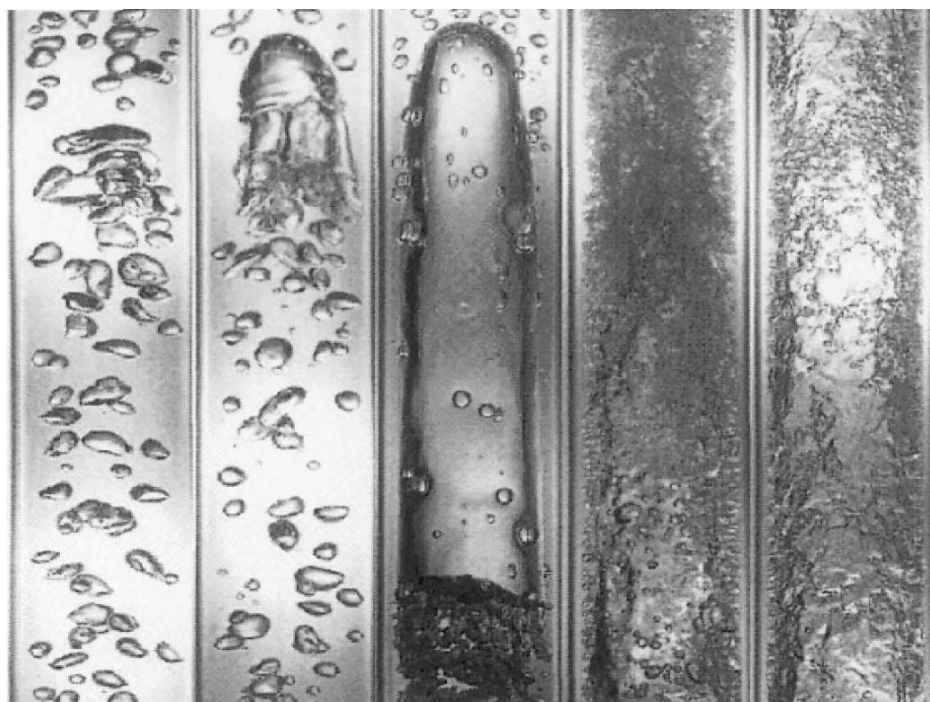
¹ Bubbly Flow

² Slug Flow

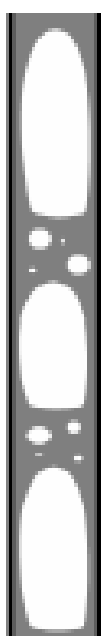
³ Churn Flow

⁴ Annular Flow

⁵ Wispy Annular Flow



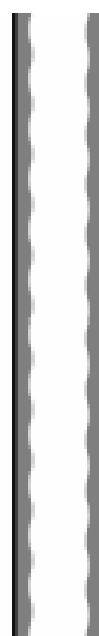
Bubbly



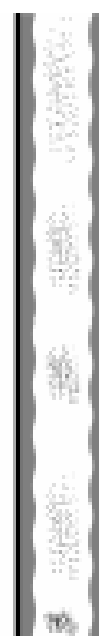
Slug



Churn



Annular



Wispy-Annular

شکل ۱-۵: الگوهای مختلف جوشش جریانی در یک لوله عمودی [۱]

یک لوله قائم تحت حرارت یکنواخت را با فلاکس حرارتی کم و تغذیه مایع زیراشباع از پایین لوله با نرخ‌ی که مایع در طول آن کاملاً تبخیر شود بررسی می‌کنیم. هنگامی که مایع تا دمای اشباع حرارت داده می‌شود و دمای دیوار زیر دمای لازم برای تشکیل هسته نگاه داشته می‌شود، فرایند انتقال

حرارت در فاز مایع، انتقال حرارت جابجایی تکفاز است (ناحیه A). در نقطه‌ای از لوله، شرایط مجاور دیوار طوری است که در محل‌های تشکیل هسته بخار می‌تواند تولید شود. تولید بخار اولیه در حضور مایع زیراشباع (ناحیه B) اتفاق می‌افتد و مکانیزم انتقال حرارت بعنوان جوشش هسته‌ای زیراشباع معروف است. در ناحیه جوشش زیراشباع، اساسا دمای دیوار چند درجه بالای دمای اشباع، ثابت میماند در حالیکه دمای متوسط بالک سیال بطرف دمای اشباع افزایش می‌یابد. مقداری که دمای دیوار از دمای اشباع تجاوز می‌کند بعنوان درجه سوپرهیت و اختلاف بین دمای اشباع و دمای بالک سیال محلی بنام درجه زیراشباع معروف است. گذر بین نواحی B و C، ناحیه جوشش هسته‌ای زیراشباع و ناحیه جوشش هسته‌ای اشباع بوضوح از نقطه نظر ترمودینامیکی تعریف می‌شود. ناحیه گذر محلی است که مایع به دمای اشباع می‌رسد و براساس محاسبات ساده تعادل حرارتی بدست می‌آید.

در ادامه برخورد حباب‌ها، حباب‌هایی بزرگتری تشکیل می‌شوند که ناگهان تمام قطر لوله را پر می‌کنند. الگوی جریان در قسمت D را رژیم اسلاگ¹ می‌نامیم، در این جریان اندازه حباب‌های بخار تقریبا به اندازه قطر لوله است، دماغه حباب دارای مشخصه کروی است و بخار موجود در حباب بوسیله یک لایه نازک مایع از دیواره لوله جدا می‌شود. جریان مایع شامل اسلاگ‌های مایعی است که بطور متوالی حباب‌های بخار را جدا می‌کنند. این اسلاگ‌ها ممکن است محتوی حبابهای بخار کوچکتري که از حباب بزرگتر جداش شده دنبال آن در حرکت باشند. طول حباب‌های بزرگ و اصلی بطور قابل ملاحظه‌ای میتواند متغییر باشد. جریان پشته‌ای توسط شکستن حباب‌های بخار بزرگ در جریان اسلاگ تشکیل می‌شود. بخار با حالت کم و بیش مغشوش داخل مایعی که اساسا بطرف دیوار کانال جابجا شدخ جریان دارد. این جریان دارای خصوصیت تناوبی یا وابسته به زمان است. بعضی مواقع به این ناحیه نیمه انیولار گفته میشود.

¹ Slug Flow

اهمیت شناخت کیفی الگوهای مختلف از آن جهت است که بتوان با شناسایی درست الگوهای مختلف و نقاط گذار از الگوهای مختلف، روابط حاکم بر انتقال حرارت را شناسایی و با هم مقایسه کرد. اغلب این نقشه‌های جریان به صورت سرعت ظاهری مایع بر حسب سرعت ظاهری گاز می‌باشد. هر یک از محققان با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مختلف در این زمینه تحقیق می‌کنند و نتایج تحقیقات خود را بصورت روابط تجربی بیان می‌کنند. در این قسمت روابط تجربی و معیارهای شروع جریان بدست آمده از محققان مختلف برای جریان تک‌فازی و جریان جوشش مادون‌سرد آورده شده است.

۱-۳-۲- جریان تک‌فازی

طول جریان تک‌فازی با استفاده از بالانس انتقال حرارت بصورت رابطه زیر بدست می‌آید [۶۶،۶۷].

$$Z_{sp} = (T_W - (T_{in} + q''/h)) \frac{Gc_{pl} D}{4q''} \quad (۲-۱)$$

جوشش سیال قبل از اینکه دمای توده سیال به مقدار اشباع برسد اتفاق می‌افتد، لذا ابتدا باید نقطه شروع جوشش را پیدا کرد، سپس با استفاده از بالانس حرارتی طول جریان تک‌فازی را محاسبه کرد. از آنجایی که دمای نقاط نزدیک به دیواره به علت هدایت حرارتی بین دیواره و سیال بالا رفته و سیال نزدیک دیواره شروع به جوشش می‌کند، بنابراین دمای توده سیال نقطه شروع جوشش^۱، پایین‌تر از دمای اشباع آب می‌باشد. حباب‌های تشکیل شده بعلاوه سرعت بیشتر سیال در مرکز، به سمت مرکز لوله حرکت کرده و بعلاوه مادون‌سرد بودن دمای مرکز لوله این حباب‌ها چگالیده می‌شوند و از بین می‌روند. نقطه شروع جوشش را بر اساس اختلاف دمای اشباع و دیواره مشخص می‌کنند. روابط تجربی مختلفی در محاسبه اختلاف دما بین دیواره و دمای اشباع در نقطه شروع جوشش وجود دارد. در جدول (۱-۱) سه رابطه مختلف برای محاسبه اختلاف دما بین دیواره و دمای اشباع در نقطه شروع جوشش آورده شده است.

^۱ ONB (Onset of Nucleate Boiling)

جدول ۱-۱ - روابط مختلف در محاسبه اختلاف دما بین دیواره و دمای اشباع در زمان شروع جوشش مادون

سرد

$$|\Delta T_{sat}|_{ONB} = 0.555 \left(\frac{q''}{1082p^{0.156}} \right)^{p^{0.0234}/2.16} \quad \text{برگلس و روزنو [۶۸]}$$

$$q''_{ONB} = \frac{h_{lg} \rho_l \rho_g k_l}{8\sigma T_s (\rho_l - \rho_g)} |\Delta T_{sat}|_{ONB}^2 \quad \text{دیویس و اندرسون [۶۶]}$$

$$|\Delta T_{sat}|_{ONB} = \frac{4\sigma T_{sat} h_l}{k_l h_{lg} \Delta \rho} \left[1 + \sqrt{\frac{k_l h_{lg} (T_s - T_b) \Delta \rho}{2\sigma T_{sat} h_l}} \right] \quad \text{ساتو و ماتسومورو [۶۹]}$$

هر یک از روش‌ها و روابط جدول فوق مقدار اختلاف دمای دیواره با دمای اشباع را بر حسب فشار و شار حرارت وارد بر دیواره مشخص می‌کنند. مقدار دمای دیوار برای شروع جوشش بصورت رابطه زیر بدست می‌آید.

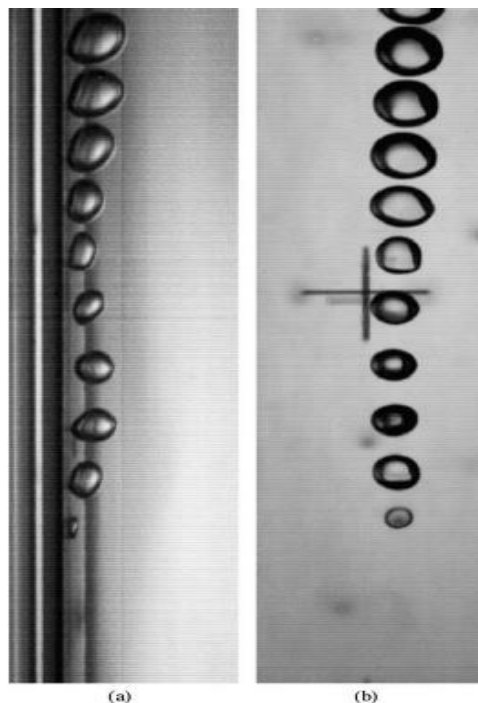
$$T_{wall} \geq T_{sat} + |\Delta T_{sat}|_{ONB} \quad (۳-۱)$$

در واقع جوشش در لوله زمانی آغاز می‌گردد که دمای دیواره به دمای رابطه فوق برسد.

۱-۳-۳- جریان جوشش مادون سرد

جوشش مادون سرد یکی از جریان‌های مهم و تاثیرگذار در جریان دوفازی در لوله‌های عمودی می‌باشد. بخاطر شار حرارت زیاد دیواره اهمیت این جریان بیشتر در لوله‌های عمودی رآکتورهای هسته‌ای می‌باشد. زمانی که بحث شار حرارت بحرانی واقع بر لوله به میان می‌آید، مقدار شارحرارت روی دیواره و همچنین مقدار شار جرمی و دیگر پارامترهای جریان باید به اندازه‌ای باشد که باعث

صدمه به لوله نگردد. نمای جانبی و روبرو از حرکت حباب در جوشش مادون سرد در لحظه شروع جوشش با دوربین‌های فوق پیشرفته در شکل (۲-۳) آورده شده است [۷۰].



شکل ۱-۶-الف) نمای جانبی ب) نمای روبرو از حرکت حباب در لحظه شروع جوشش [۷۰]
برای به‌دست آوردن طول جوشش مادون سرد از بالانس حرارت استفاده می‌کنیم:

$$q'' \pi D z = \frac{G \pi D^2}{4} (h_s - h_i) + \frac{G \pi D^2}{4} X h_{lg} \quad (۴-۱)$$

درواقع آنتالپی سیال در نقطه پایان جوشش مادون سرد، آنتالپی مایع اشباع است. طول انتهایی جوشش مادون سرد به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$Z_{sub} = \frac{GD}{4q''} (h_s - h_i) \quad (۵-۱)$$

برای به‌دست آوردن طول جوشش مادون سرد باید این طول را از مقدار طول جریان تک‌فازی کم کرد. مقدار شار حرارت مرزی برای بوجود نیامدن جوشش مادون سرد بصورت رابطه (۲-۵) می‌باشد [۷۱].

این مقدار حداقل شار گرمی لازم برای بوجود آمدن جوشش مادن سرد است و زمانی که شار گرمی از این مقدار کمتر باشد، جوشش مادن سرد در لوله بوجود نمی‌آید.

$$q_{ONB} = \frac{4 h_{cb}^2}{k_f} \left[\frac{2 \sigma T_{sat} v_{lg} (\rho_l - \rho_g)}{\rho_g h_{lg}} \right] , \quad h_{cb} = 0.023 \left(\frac{k_f}{D} \right) \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \quad (6-1)$$

در رابطه بالا h_{cb} ضریب انتقال حرارت جریان تک‌فازی می‌باشد که با استفاده از رابطه دیتوس-بولتر بدست می‌آید [۷۱].

فصل دوم: مروری بر پیشینه

تحقیق

۲-۱- مقدمه

انتقال حرارت جوشش جریانی مادون‌سرد سیال به علت استفاده وسیع در صنایع مختلف به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور تجربی تأیید شده است که جوشش جریان مادون‌سرد نسبت به جوشش جریان اشباع، انتقال حرارت بالاتر و شار حرارتی بحرانی^۱ بالاتری دارد [۷۲، ۷۳]. در خصوص اهمیت انتقال حرارت جوشش جریانی و عوامل تاثیرگذار بر آن در این بخش به مروری گذرا بر کارهای محققین در گذشته پرداخته شده است.

۲-۲- پیشینه پژوهش

نخستین پژوهش‌ها در زمینه‌ی انتقال حرارت جوشش جابجایی، توسط افرادی چون گانگر و وینترتون [۶، ۷]، شاه [۳۴، ۳۵] و کاندلیکار [۸، ۹]، با انجام آزمایش‌های گوناگون و به دست آوردن تعداد زیادی از داده‌های آزمایشگاهی انجام پذیرفت. هم‌چنین این دانشمندان پیشرو با ارائه‌ی روابطی که به کمک آنها بتوان با خطای کم رفتار آزمایشگاهی داده‌های مورد بررسی را تقریب زد، نقش و سهم به‌سزایی در بنیان‌گذاری علم انتقال حرارت جریان دوفازی داشته‌اند. گانگر و وینترتون [۶] رابطه‌ای تجربی با استفاده از داده‌های آزمایشی ۲۸ پژوهشگر مختلف برای سیالاتی نظیر آب، مبردها و اتیلن‌گلیکول برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی در سال ۱۹۸۵ ارائه دادند. نتایج حاصل از رابطه تجربی مطابقت بالایی با داده‌های آزمایشگاهی داشت و انحراف میانگین ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی محاسبه شده توسط رابطه‌ی آنها با مقادیر آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده برابر با ۲۱/۴ درصد برای جوشش جریانی اشباع و ۲۵ درصد برای جوشش جریانی مادون‌سرد به دست آمد. کالیزو و همکاران [۷۴] در سال ۲۰۰۷ ضریب انتقال حرارت جوشش جریان مادون‌سرد را برای مبرد R-134a در یک مجرای استوانه‌ای قائم به طور آزمایشگاهی مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. به

¹Critical heat flux

طور دقیق و کاملاً ریزبینانه، اثر تغییر شارحرارتی دیواره، شار گرمی ورودی، دمای مادون‌سرد سیال ورودی، فشار سیستم و قطر کانال بر روی انتقال حرارت جوشش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به صورت منحنی‌های جوشش و ضرایب انتقال حرارت بیان شد. مطابق نتایج آنها، افزایش دبی گرمی جریان باعث سریع‌تر رخ دادن جوشش مادون‌سرد شده و ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. مشاهده شد که افزایش مادون‌سرد بودن سیال ورودی، افزایش فشار سیستم و کاهش قطر کانال موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش شده لیکن روابط تجربی کلاسیک قادر به پیش‌بینی روند افزایشی ضریب جابجایی در این شرایط نیست. اوهایب و همکاران [۷۵] در سال ۲۰۰۶ به بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی جریان سیال R-134a در یک لوله‌ی مدور قائم از جنس کوارتز، با انتقال حرارت یکنواخت به سطح آن توسط یک گرمکن پرداختند. پژوهش آنها به الگوهای جریان بخار در کیفیت‌های بالای آن معطوف بوده است. همچنین شارحرارتی متناسب با شار گرمی تغییر داده شد و مشاهده گردید که در شارهای گرمی پایین، نوسان زیادی در موقعیت حرکت سیال وجود داشته و تبخیر، کند صورت می‌گیرد اما در شارهای گرمی بالا، رفتاری عکس آن مشاهده گردید. ژو و همکاران [۷۶] در سال ۲۰۰۹ برای دستیابی به خصوصیات جریان دوفازی آب- بخار در محدوده‌ی نسبتاً وسیعی از شارحرارتی، شارگرمی و فشار ورودی سیال عامل، آزمایش‌های مختلفی را برای جریان سیال بالارونده در لوله‌ی قائم انجام دادند. مطابق نتایج مشخص شد که در نواحی مادون فشار بحرانی، مکانیزم اصلی انتقال حرارت، الگوی جریان خشک بوده و در نواحی نزدیک به فشارهای بحرانی، مکانیزم اصلی، انحراف از جوشش هسته‌ای می‌باشد. همچنین رابطه‌ای به منظور محاسبه‌ی عدد نوسلت جابجایی اجباری در نواحی فشارهای فوق بحرانی ارائه گردید که می‌تواند ضریب انتقال حرارت را در جریان سیال بالارونده با خطای کمی، پیش‌بینی کند. انور و همکاران [۳۱] در سال ۲۰۱۴ به مطالعه و بررسی ضریب انتقال حرارت جوشش سیال عامل R-152a در یک ریزکانال قائم پرداختند. آزمایش‌های آنها روی لوله‌ی افقی از فولاد ضد زنگ معطوف بوده و تغییر پارامترهایی مانند

طول و قطر لوله، دمای اشباع مایع و شار جرمی ورودی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که انتقال حرارت به طور چشمگیری تحت تأثیر شارحرارتی اعمال شده به دیواره قرار داشته و افزایش دبی جرمی باعث افزایش شارحرارتی فوق بحرانی می‌شود، همچنین نتایج نشان داد که شار فوق‌بحرانی تأثیرپذیری ناچیزی با تغییر فشار عملکردی نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها با روابط تجربی در مقیاس ماکرو و میکرو مقایسه و مورد بررسی قرار گرفت. ژیشن و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۴ به مطالعه و بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی جریان سیال پایین رونده در یک لوله‌ی قائم برای محدوده‌ی گسترده‌ای از پارامترهای فشار، شار جرمی و شارحرارتی پرداختند. آب به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شد و نمودار توزیع حرارتی در نزدیکی دیواره ترسیم گردید. در ادامه اثر شارحرارتی دیواره روی ضریب انتقال حرارت و درجه حرارت دیواره بررسی شد و روابط جدیدی بدست آمد، همچنین به مقایسه ضریب انتقال حرارت در جریان‌های پایین‌رونده و بالارونده پرداخته شد. با انجام روش عددی مشخص شد که ضریب انتقال حرارت در فشارهای مافوق بحرانی کاهش یافته است در نتیجه بیشترین مقدار دمای دیواره افزایش می‌یابد. پیغمبرزاده و همکارانش [۱۷] در سال ۲۰۱۳ با ساخت ست اپ آزمایشگاهی به مقایسه و اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جوشش مادون سرد n-Heptane و آب مقطر در شرایط عملیاتی متفاوت پرداختند. مبدل حرارتی در نظر گرفته شده متشکل از لوله‌های حلقوی عمودی که سطح داخلی آنها توسط گرمکن‌های دایروی به طور یکنواخت حرارت داده می‌شدند. مطابق نتایج معین شد با افزایش نرخ جریان مایع و درجه‌ی مادون‌سرد بودن، ضریب انتقال حرارت جوشش زیراشباع روند صعودی و افزایشی از خود نشان می‌دهد. همچنین اثر شرایط عملیاتی روی تولید حباب و به تبع آن ضریب انتقال حرارت سطحی مورد بحث قرار گرفت و گفته شد که در مقایسه با n-Heptane، آب مایع بهتری در خنک‌کاری و جذب گرماست. در سال ۲۰۱۳ پیغمبرزاده و همکارانش [۱۸] با ساخت دستگاه آزمایشگاهی به مطالعه انتقال حرارت جوشش زیراشباع مخلوط آب و دی اتیلن گلیکول در بین دو لوله هم محور عمودی

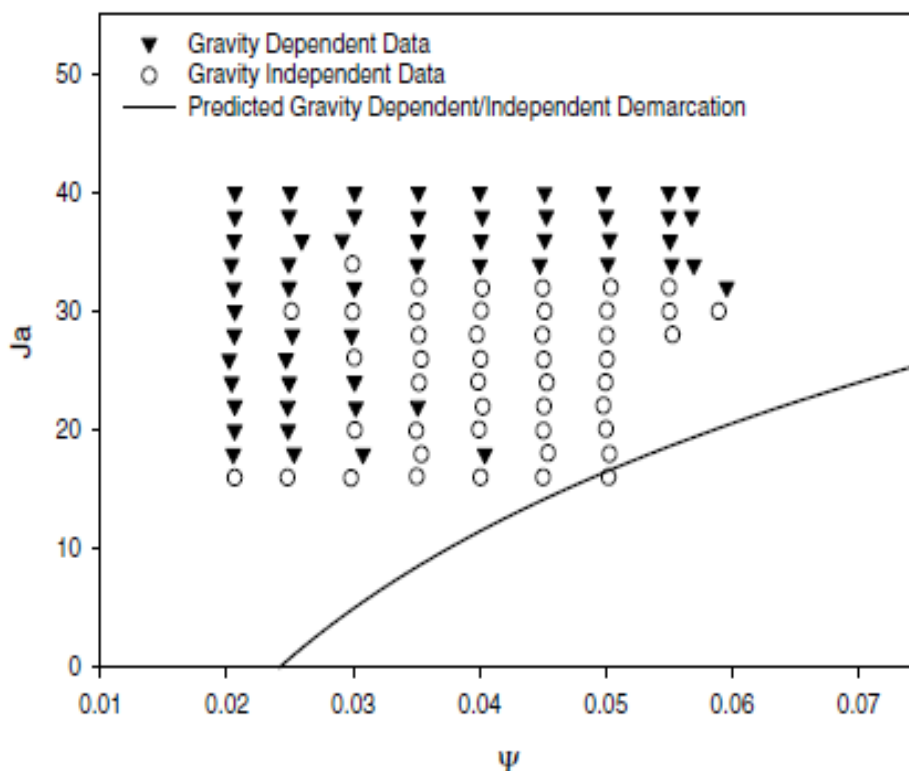
پرداختند و نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت با افزایش دبی، افزایش می‌یابد. کاندلیکار و همکاران [۱۰] به بررسی آزمایشگاهی جوشش جریان‌ی زیراشباع و اشباع در یک کانال مستطیلی شکل پرداختند. همچنین به مطالعه رژیم‌های گوناگون جریان جوشش با ثبت تصاویر در میکرو کانال پرداختند. کاندلیکار و اسپیسمن [۱۱] به مطالعه تاثیر زبری بر انتقال حرارت جوشش جریان‌ی زیراشباع آب خالص روی یک سطح گرم‌شده پرداختند. آزمایش‌ها برای چهار زبری گوناگون انجام و نتایج نشان داد که میزان انتقال حرارت جوشش جریان‌ی در سطح زبرتر بیشتر است. در سال ۲۰۱۷، زنوزی و همکاران [۱۲] به مطالعه تاثیر قطر لوله بر انتقال گرما جوشش جریان‌ی زیراشباع بین دو لوله هم‌مرکز پرداختند. آزمایش‌ها برای اندازه‌های گوناگون از فضای بین دو لوله انجام و نتایج نشان دادند که ضریب انتقال حرارت جوشش زیراشباع با کاهش فضای بین دو لوله هم‌مرکز افزایش می‌یابد، همچنین مقدار شار گرمی بر حداکثر دمای سطح لوله اثر دارد. در مطالعه‌ای دیگر زنوزی و همکاران [۱۳] به بررسی عددی و آزمایشگاهی اثر چرخشی کردن جریان بر انتقال حرارت جریان جوشش زیراشباع در فضای بین دو لوله هم‌مرکز پرداخته شد. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت جوشش زیراشباع با ایجاد جریان چرخشی، شارحرارتی بحرانی افزایش یافته و نتایج حل عددی نیز نتایج آزمایشگاهی را تصدیق کرد.

یو و همکارانش [۷۷] با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی به مطالعه انتقال حرارت جوشش زیراشباع ترکیب آب و شکر در بین دو لوله هم‌محور پرداخته شد. همچنین لی و همکارانش [۲۱] به صورت تجربی تأثیر لغزش حباب روی دیواره، در جریان مادون‌سرد آب در یک کانال مستطیل شکل عمودی را مورد بررسی قرار دادند، آنها مشاهده کردند نیروی برا باعث می‌شود که حبابها از سطح جدا نشده و روی دیواره بلغزند. یان و همکاران [۲۲] در تحقیقاتشان به بررسی تجربی جوشش جریان‌ی مادون‌سرد آب در لوله‌های هم‌مرکز پرداختند. آزمایش‌ها در محدوده شارحرارتی، شار گرمی و دمای مادون‌سرد ورودی به ترتیب، $370 - 563 \text{ kW/m}^2$ ، $1110 - 2100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ، $31 - 19$ و فشار طراحی 0.2 -

۰/۱۵ مگاپاسکال انجام شدند. همچنین قطر خارجی و داخلی لوله‌های هم مرکز، ۳۵ و ۹ میلی‌متر است. نتایج آزمایشات نشان داد که سرعت تشکیل حباب‌ها با افزایش شارحرارتی، افزایش می‌یابد و وابستگی کسر حجمی فازها به شار جرمی و شارحرارتی تایید شد. کاشی و همکاران [۲۴] به مطالعه انتقال حرارت جریان جوششی سیال کاری آب درون یک لوله عمودی تحت فشار یک بار و فلاکس حرارتی پرداختند. همچنین به بررسی تاثیر محیط متخلخل بر جوشش جریان پراختند، بدین منظور از یک اسفنج فلزی استفاده شده و بعد از انجام آزمایش‌ها در لوله عمودی خالی، اسفنج را درون لوله جای داده و آزمایش‌ها تکرار شد. آزمایش‌ها را با تغییر پارامترهای فلاکس حرارتی و شار جرمی در هر دو حالت لوله خالی و پر شده با اسفنج انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از محیط متخلخل باعث بهبود ضریب انتقال حرارت $1/5$ تا $1/82$ برابری نسبت به لوله خالی می‌شود. آزمایش‌ها در محدوده شار حرارتی $23-36 \text{ kW/m}^2$ و شار جرمی $38-53 \text{ kg/m}^2\text{s}$ انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از اسفنج فلزی الگوی جریان همچنان لخته‌ای باقی می‌ماند. در سال ۲۰۱۶ چن [۱۴] به بررسی پارامترهای اصلی حباب در دوره‌های زمانی مختلف بین دو لوله هم‌مرکز با استفاده از سیال مبرد پرداخت. نتایج تحقیقات نشان داد که فرکانس و قطر جدایش حباب با تغییرات شارحرارتی تغییر می‌کند. مرکادو و همکاران [۱۶] با استفاده از منابع ۴۰ تحقیق به بررسی مقادیر شارحرارتی بحرانی و روابط ارائه شده ضریب انتقال حرارت در جریان‌های دوفازی پرداختند. حمدی [۱۹] به بررسی تاثیر میدان مغناطیسی، ایجاد ارتعاش، استفاده از محیط متخلخل و بکارگیری نانو سیال و همچنین زبرکردن سطح بر انتقال حرارت درون لوله‌های هم مرکز پرداختند. هرناندز و همکاران [۲۰] به مطالعه رژیم‌های گوناگون که در جریان دوفازی درون لوله‌های عمودی اتفاق می‌افتد، پرداخته‌اند. در سال ۲۰۱۰ وو و همکاران [۲۳] به مطالعه آغاز جوشش هسته‌ای در فضای بین دو لوله هم‌مرکز برای سیال کاری آب پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش شار جرمی، فشار، دمای سوپرهیت دیواره مقدار شروع جوشش افزایش می‌یابد. همچنین مشاهدات

آزمایش‌ها مشخص شد که آغاز جوشش هسته‌ای، می‌تواند در سطح بیرونی، گاهی در سطح داخلی و حتی همزمان در دو سطح دو لوله هم‌مرکز اتفاق بیافتد. در سال ۲۰۱۴ امین‌فر و همکارانش [۲۵] با بکار بردن میدان مغناطیسی اثر آن را بر روی مایع فرو در لوله‌های انحنادار و مستقیم بررسی کردند. در این تحقیق به صورت عددی با استفاده از مدل دوفازی مختلط و روش حجم کنترل به مطالعه رفتار هیدروترمال جریان مایع در لوله پرداختند. در این مطالعه از شیب‌های مختلف میدان مغناطیسی خطی در جهت عمود بر جریان اصلی استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد که، با استفاده از لوله انحنادار به جای لوله مستقیم ضریب انتقال حرارت را افزایش داد و همچنین با افزودن نانوذرات مغناطیسی به مایع اصلی در میدان مغناطیسی باعث بالابردن ضریب انتقال حرارت شد. دلیل این افزایش را اضافه شدن نانوذرات به مایع که نسبت به حالت بدون ذرات میزان هدایت گرما را بالا میبرد. فنگ و همکارانش [۲۶] روابط جوشش جریانی زیراشباع را با بکاربردن داده‌های آزمایشگاهی منابع مختلف توسعه داده‌اند. بوور و همکارانش [۲۷] به بررسی تأثیر گرانش بر انتقال حرارت جوشش جریانی مادون سرد با سیال میرد در یک لوله آزمایش در زوایای مختلف صفر، ۴۵ و ۹۰ و جریان به‌طرف بالا و جریان به‌طرف پایین در زوایای ۲۷۰ و ۳۱۵ پرداختند. همانطور که در شکل ۲-۱ آورده شده است به بررسی جریانی پرداختند که در آن انتقال حرارت مستقل از گرانش است و نتایج را با هم مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر گرانش بر انتقال حرارت جوشش جریانی با افزایش سرعت مایع کمتر شده و همچنین انتقال حرارت جریان جوششی در اعداد جاکوب کم مستقل از گرانش می‌باشد. در یک تحقیق آزمایشگاهی، سوگرو و همکارانش [۲۸] به آشکارسازی اثر پارامترهای مختلف از جمله دمای ورودی مادون سرد، شارجرمی، فلاکس حرارتی و همچنین زاویه لوله و فشارکاری بر قطر جدایش حباب با استفاده از دوربین پرسرعت شدند. نتایج نشان داد با افزایش فلاکس حرارتی، کاهش شارجرمی، کاهش دمای ورودی مادون سرد و کاهش فشار کاری، قطر جدایش حباب افزایش یافته و با افزایش زاویه، قطر جدایش حباب کاهش یافته، در نتیجه در سطوح افقی و بسمت پایین

قطر جدایش حباب‌ها به بیشترین حد خود می‌رسد.



شکل ۲-۱: نقشه جوش جریانی استقلال / وابستگی گرانش و مقایسه با مطالعه بوور [۲۷]

مارس و ست‌مایر [۲۹] در تحقیق‌شان رفتار حباب در فرایند جوش جریانی آب در فشار اتمسفریک را مورد بررسی قرار دادند. یک کانال با سطح مقطع مستطیلی را بعنوان قسمت آزمون در نظر گرفتند و شارحرارتی به یک طرف کانال وارد کردند. همچنین به وسیله دوربین پرسرعت و وضوح بالا به بررسی رفتار حباب پرداختند، نتایج نشان داد که حباب باعث افزایش مقاومت شده و روی سرعت فاز مایع تاثیر بالایی می‌گذارند. احمدی و همکارانش [۳۰] تاثیر پارامترهای فلاکس حرارتی، شار جرمی و همچنین اثر مادون سرد ورودی بر مکان شروع جوش هسته‌ای برای جریان جوش مادون سرد بین دو لوله هم‌مرکز را مورد بررسی قرار دادند. گپ‌ینگ و همکارانش [۳۲] به مطالعه ناپایداری‌های جریان جوش در بین دو لوله هم‌مرکز پرداخته و اثر دمای مادون سرد ورودی، فشار کاری و همچنین تاثیر شار جرمی بر آن را مورد بررسی قرار دادند. امین‌فر و همکارانش [۳۳] به مطالعه قطر جدایش در

جوشش جریانی زیراشباع و اثر میدان مغناطیسی بر آن را بررسی کرده‌اند و نتایج نشان داد که میدان باعث تغییر قطر جدایش حباب می‌شود. نتایج مطالعات نشان داد که با افزایش شارحرارتی و کاهش شار جرمی، قطر جدایش حباب افزایش یافته است. در امتداد کارهای انجام شده، شاه روابطی برای جریان جوششی مطرح کردند که به تکمیل شدن تحقیقات کمک شایانی کرد [۳۴-۳۵].

۲-۳- پیشینه روابط موجود در منابع

بررسی وسیع کیم و قجر [۳۶] در ارتباط با جریان‌های دوفازی به فراهم‌آوری رابطه‌های مهم موجود در لوله افقی و عمودی منجر شد و در فرم رابطه‌های انتخاب شده برای جریان دوفازی مطرح شد. با بررسی‌های انجام شده در منابع گوناگون، بیست رابطه برای جریان دوفازی انتخاب شد که برگرفته از بالای ۵۰۰ نقطه داده از پژوهش‌های گذشته بر روی رژیم‌های گوناگون دوفازی در لوله‌های افقی و عمودی می‌باشد. روابط ارائه شده در این مطالعه برای رژیم‌های جریان‌های در و حالت لوله افقی و عمودی است، البته بعضی از این روابط برای یک رژیم جریانم مطرح شده و نمی‌توان در رژیم‌های دیگر جریان‌های دوفازی از آن بهره برد. در جدول‌های ۱-۳، ۲-۳، ۳-۳، ۴-۳ رابطه‌های منتخب کیم و قجر که در جریان‌های دوفازی افقی و عمودی بکار می‌روند همراه با شرط‌های موجود در جریان‌ها آورده شده است. از شرط‌های جریان دوفازی آورده شده برا روابط می‌توان به نوع و آرام یا آشفته بودن جریان سیال و زاویه لوله نام برد.

جدول ۲-۱: رابطه‌های انتخاب شده کیم و قجر برای انتقال حرارت جریان دوفازی [۳۶]

منابع	رابطه انتقال حرارت	شرط جریان
چو و جونز ^۱ [۳۷]	$Nu_{Tp} = \frac{h_{Tp} D}{k_l}$ $= 0.43 Re_{Tp}^{0.5} Pr_l^{0.33} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14} \left(\frac{P_a}{P} \right)^{0.17}$	لوله عمودی، $Re_{sl} = 16000 - 112000$
آگوار [۳۸]	$\frac{h_{Tp}}{h_l} = (1 - \alpha)^{-\frac{1}{3}}$ $Nu_l = 1.615 \left(Re_{sl} Pr_l \frac{D}{L} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14}$ $\frac{h_{Tp}}{h_l} = (1 - \alpha)^{-0.83}$ $Nu_l = 0.0155 Re_{sl}^{0.83} Pr_l^{0.55} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.33}$	جریان آرام جریان آشفته جریان آرام جریان آشفته
دیویس و دیوید ^۲ [۳۹]	$Nu_l = 0.060 Pr_l^{0.4} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.28} \left(\frac{G_t x D}{\mu_l} \right)^{0.87}$	لوله عمودی و افقی گاز-مایع
دورستیجن ^۳ [۴۰]	$\frac{h_{Tp}}{h_l} = (1 - \alpha)^{-\frac{1}{3}}$ $\frac{h_{Tp}}{h_l} = (1 - \alpha)^{-0.8}$ $Nu_l = 0.0123 Re_{sl}^{0.9} Pr_l^{0.33} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14}$	جریان آرام جریان آشفته $Re_{sl} = 300 - 66000$
دوسیو ^۴ [۴۱]	$Nu_{Tp} = 0.029 Re_{TP}^{0.87} Pr_l^{0.4}$	لوله عمودی، $Re_{sl} = 1.4 * 10^4 - 4.9 * 10^4$
سرینویاس ^۵ [۴۲]	$Nu_{TP} = 0.5 \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{1/4} Re_{TP}^{0.7} Pr_l^{0.33}$	لوله عمودی، گلیسرین و هوا

¹ Chu and Jones

² Davis and David

³ Dorresteiijn

⁴ Dusseau

⁵ Srinivas

جدول ۲-۲: ادامه رابطه‌های انتخاب شده کیم و قجر برای انتقال حرارت جریان دوفازی [۳۶]

منابع	رابطه انتقال حرارت	شرط جریان
کنت ^۱ [۴۳]	$\frac{h_{Tp}}{h_l} = (1 + \frac{V_{sg}}{V_{sl}})^{\frac{1}{3}}$	h_l سایدرویت
کدیرکا ^۲ [۴۴]	$Nu_{TP} = 125 (\frac{V_{sg}}{V_{sl}})^{1/8} (\frac{\mu_g}{\mu_l})^{0.6} Re_{sl}^{1/4} Pr_l^{0.33} (\frac{\mu_B}{\mu_w})^{0.14}$	آب و هوا، لوله عمودی
مارتین و سیمس ^۳ [۴۵]	$\frac{h_{Tp}}{h_l} = 1 + 0.64 \sqrt{\frac{V_{sg}}{V_{sl}}}$	آب و هوا، لوله افقی
الیور و رایت ^۴ [۴۶]	$Nu_{TP} = Nu_l \left(\frac{1.2}{(1-\alpha)^{0.36}} - \frac{0.2}{(1-\alpha)} \right)$ $Nu_l = 1.615 \left(\frac{(Q_g + Q_l)\rho D}{A\mu} Pr_l \frac{D}{L} \right)^{1/3} (\frac{\mu_B}{\mu_w})^{0.14}$	هوا
راویپودی و گادبلد ^۵ [۴۷]	$Nu_{TP} = 0.56 (\frac{V_{sg}}{V_{sl}})^{0.3} (\frac{\mu_g}{\mu_l})^{0.2} Re_{sl}^{0.6} Pr_l^{0.33} (\frac{\mu_B}{\mu_w})^{0.14}$	آب و هوا، لوله عمودی $Re_{sl} = 8000 - 89000$
رزکالا و سیمس ^۶ [۴۸]	$\frac{h_{Tp}}{h_l} = (1 - \alpha)^{-0.9}$	h_l سایدرویت
سریزاوا ^۷ [۴۹]	$\frac{h_{Tp}}{h_l} = 1 + 462 X_{TT}^{-1.27}$	h_l سایدرویت

¹ Knott et.al

² Kudirka et.al

³ Martin and Sims

⁴ Oliver & wright

⁵ Ravipudi & Godbold

⁶ Rezkallah & Sims

⁷ Serizawa

جدول ۲-۳: ادامه رابطه‌های انتخاب شده کیم و قجر برای انتقال حرارت جریان دوفازی [۳۶]

منابع	رابطه انتقال حرارت	شرط جریان
شاه ^۱ [۵۰]	$Nu_l = 1.86 \left(Re_{sl} Pr_l \frac{D}{L} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14}$	جریان آرام
	$Nu_l = 0.023 Re_{sl}^{0.8} Pr_l^{0.4} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14}$	جریان آشفته
	$\frac{h_{Tp}}{h_l} = \left(1 + \frac{V_{sg}}{V_{sl}} \right)^{\frac{1}{4}}$	
گورتوس و هندل ^۲ [۵۱]	$Nu_l = 0.029 Re_{TP}^{0.87} Pr_l^{1/3} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14}$	(آب و هوا)
	$Nu_l = 2.6 Re_{TP}^{0.39} Pr_l^{1/3} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14}$	(هوا و گاز و نفت)
هگمارک ^۳ [۵۲]	$Nu_l = 1.75 (1 - \alpha)^{-1/2} \left(\frac{\dot{m} c_{Pl}}{(1 - \alpha) k_l L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14}$	گاز و مایع، لوله افقی
خوزه ^۴ [۵۳]	$Nu_{TP} = 0.26 Re_{sg}^{0.2} Re_{sl}^{0.55} Pr_l^{0.4}$	آب و هوا، لوله عمودی
کینگ ^۵ [۵۴]	$\frac{h_{Tp}}{h_l} = \frac{(1 - \alpha)^{-0.52}}{1 + 0.025 Re_{sg}^{0.5}} \left(\frac{(\frac{\Delta P}{\Delta L})_{TP}}{(\frac{\Delta P}{\Delta L})_l} \right)^{0.32}$ $Nu_l = 0.023 Re_{sl}^{0.8} Pr_l^{0.4}$	آب و هوا، لوله افقی
هنوکا ^۶ [۵۵]	$Nu_{TP} = 0.075 (Re_M)^{0.6} \frac{Pr_l}{1 + 0.035 (Pr_l - 1)}$	مایع و هوا، عمودی

¹ shah

² Groothuis and Hendal

³ Hugmark

⁴ Khoze et.al

⁵ king

⁶ Hanaoka

جدول ۲-۴: ادامه رابطه‌های انتخاب شده کیم و قجر برای انتقال حرارت جریان دوفازی [۳۶]

منابع	رابطه انتقال حرارت	شرط جریان
ویجی و همکاران ^۱ [۵۶]	$\frac{h_{TP}}{h_l} = \left(\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_l} \right)^{0.451}$ $Nu_l = 1.86 \left(Re_{sl} Pr_l \frac{D}{L} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14}$ $Nu_l = 0.023 Re_{sl}^{0.8} Pr_l^{0.4} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14}$	جریان آرام جریان آشسته
سایدر و تیت [۵۷]	$Nu_l = 1.86 \left(Re_{sl} Pr_l \frac{D}{L} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14}$ $Nu_l = 0.027 Re_{sl}^{0.8} Pr_l^{0.33} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14}$	جریان آرام جریان آشسته

تعاریف اعداد بدون بعد ناسلت، رینولدز و پرانتل در زیر آورده شده است:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (۲-۱)$$

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (۲-۲)$$

$$Pr = \frac{\rho c_p}{\mu} \quad (۲-۳)$$

ρ ، μ و u به ترتیب بیان‌کننده چگالی، ویسکوزیته دینامیکی سیال و سرعت سیال هستند، ϑ ویسکوزیته سینماتیکی، α ضریب نفوذ حرارتی، h ضریب انتقال گرما جابه‌جایی، k ضریب رسانش سیال و D قطر هیدرولیکی لوله هستند. در رابطه‌های بالا Nu_{TP} عدد ناسلت جریان دوفازی، Re_{TP} عدد رینولدز جریان دوفازی، Nu_l عدد ناسلت جریان تک‌فاز، h_{TP} ضریب انتقال گرما جریان دوفازی، h_l ضریب انتقال گرما جریان تک‌فاز، Re_{sl} عدد رینولدز ظاهری مایع، Re_{sg} رینولدز ظاهری گاز، Pr_l عدد پرانتل جریان تک‌فاز هستند. μ_B لزجت سیال در دمای بالک، μ_w ویسکوزیته سیال در دمای دیواره، P فشار، ρ_l چگالی مایع، ρ_g چگالی گاز، μ_l لزجت مایع، μ_g لزجت گاز، V_{sg} سرعت متوسط ظاهری گاز، V_{sl} سرعت متوسط ظاهری مایع، α درصد تخلخل، X_{TT} ضریب لاکهارت مارتینلی، D

¹Vijay et al.

قطر لوله، $\dot{m}$ دبی جرمی، ΔP_l افت فشار در جریان تکفاز، ΔP_{TP} افت فشار در جریان دوفازی، C_{Pl} گرمای ویژه سیال هستند.

۲-۴- روابط منتخب در انتقال حرارت تکفاز لوله‌های هم‌مرکز

کیم و قجر [۳۶] در تحقیقاتشان نشان دادند هیچکدام از روابط، تمام الگوهای جریان دوفازی را پوشش نداده و ضروریست برای الگوهای مختلف جریان و انتقال حرارت تکفاز، روابطی تعریف شود. در روابط ارائه شده توسط کیم و قجر برای هرکدام از شرایط مطرح شده جریان دوفازی، رابطه‌ای برای ضریب انتقال گرمای حالت تکفاز ارائه شده است. در اکثر روابط موجود جریان جوشش لوله عمودی بمنظور بدست آوردن ضریب انتقال گرمای حالت تکفاز، معادله دیتوس بولتر^۱ و سایدنر و تیت^۲ ارائه شده است. بمنظور بدست آوردن ضریب انتقال گرمای حالت تکفاز جریان‌های آرام را از رابطه سایدنر و تیت دیتوس بولتر و همچنین ضریب انتقال گرمای حالت تکفاز جریان‌های آرام محدود میشود، بمنظور بدست آوردن ضریب انتقال گرمای حالت تکفاز از رابطه سایدنر و تیت بکارگرفته شده است. معادله دیتوس بولتر [۵۸] برای جریان آشفته در زیر آورده شده است:

$$\frac{h_l D}{k} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (۲-۴)$$

معادله ۳-۵، معادله سایدنر و تیت [۵۷] می‌باشد که بمنظور بدست آوردن ضریب انتقال گرمای حالت تکفاز جریان آرام بکار گرفته می‌شود. از شرایط استفاده این معادله، سطح مقطع دایروی لوله و توسعه‌یافتگی هیدرودینامیکی و حرارتی است. محدوده اعداد رینولدز و پرانتل جریان بمنظور استفاده از این معادله بصورت زیر تعریف می‌شود: $300 < Re < 10000$ ، $0.7 < Pr < 16$ و $L/D \geq 10$

¹ Dittus & boelter

² Sider & Tate

$$Nu_l = 1.86 \left(Re_l Pr_l \frac{D}{L} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (2-5)$$

μ_w و μ_b بترتیب ویسکوزیته سیال در دمای توده سیال و دمای دیواره است. همچنین u و ρ بترتیب سرعت و چگالی سیال و μ نیز لزجت سیال است.

۲-۵- روابط منتخب در انتقال حرارت جوشش جریانی برای لوله‌های هم‌مرکز عمودی

در ادامه فصل، معادلات مطرح شده برای جریان جوششی درون فضای بین دو لوله هم‌مرکز عمودی در پژوهش‌های گذشته پرداخته می‌شود.

۲-۵-۱- رابطه چن

معادله ۷-۳ را چن [۵۹] بمنظور پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت دوفازی جریان جوششی سیال در لوله عمودی ارائه کرد. پیشنهاد کرد که بیانگر دو ناحیه جوشش هسته‌ای اشباع و ناحیه جابه‌جایی اجباری می‌باشد.

$$h_{Tp} = Sh_{nb} + Fh_{cb} \quad (2-6)$$

این رابطه شامل دو بخش، شامل ناحیه جوشش هسته‌ای اشباع و جابجایی اجباری است. در بخش اول تساوی h_{nb} و S بترتیب کمیت انتقال گرما و فاکتور افزایش انتقال گرما مرتبط به جوشش هسته‌ای است و در بخش دوم تساوی، h_{cb} و F بترتیب کمیت انتقال گرمای جابه‌جایی و فاکتور افزایش انتقال گرمای جابه‌جایی است. همچنین از معادله دیتس-بلتر، کمیت انتقال حرارت جابه‌جایی h_{cb} را می‌توان محاسبه کرد.

$$\frac{h_{cb}D}{k} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (2-7)$$

چن برای بدست آوردن کمیت انتقال گرما جوشش هسته‌ای از معادله فستر و زیر^۱ بهره برد.

$$h_{nb} = 0.00122 \left(\frac{k_f^{0.79} c_{pf}^{0.45} \rho_f^{0.49}}{\alpha^{0.5} \mu_f^{0.29} h_{fg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} \right) \Delta T_{sat}^{0.24} \Delta P_{sat}^{0.75} \quad (2-8)$$

ΔT_{sat} و ΔP_{sat} بترتیب دمای سوپرهیت دیواره و اختلاف فشار اشباع مایع در دمای دیواره و دمای توده سیال هستند، تعریف آنها در زیر آورده شده است.

$$\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat} \quad (2-9)$$

$$\Delta P_{sat} = P_w - P_{sat} \quad (2-10)$$

کمیت F را از معادله ۳-۱۲ بدست می‌آوریم:

$$F = \left(\frac{1}{X_{tt}} + 0.213 \right)^{0.736} \quad (2-11)$$

X_{tt} کمیت مارتینلی گفته می‌شود و از معادله ۳-۱۳ بدست می‌آوریم:

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_f}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (2-12)$$

زمانی که $\frac{1}{X_{tt}} \leq 0.1$ ، $F=1$ است.

کمیت S را از معادله ۳-۱۴ بدست می‌آوریم:

$$S = \frac{1}{1 + 0.00000253 Re_{Tp}^{1.17}} \quad (2-13)$$

$$Re_{Tp} = Re_f F^{1.25} \quad (2-14)$$

$$Re_f = \frac{G(1-x)D}{\mu_f} \quad (2-15)$$

¹ Forster & zuber

۲-۵-۲- رابطه جگر و وینتتون^۱

معادله دیگری ۲-۱۶ را جگر و وینتتون [۶۰] بمنظور محاسبه کمیت انتقال حرارت در جریان جوششی آب و مبرد در لوله‌های عمودی هم‌مرکز منتشر کردند. E و S بترتیب کمیت‌های افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و افزایش انتقال حرارت در جوشش هسته‌ای هستند و از معادله‌های ۲-۱۷ و ۲-۱۸ بدست می‌آیند:

$$h_{Tp} = Sh_{nb} + Eh_{cb} \quad (2-16)$$

$$S = \frac{1}{1 + 1.15 \times 10^{-6} E^2 Re_{Tp}^{1.17}} \quad (2-17)$$

$$E = 1 + 24000 BO^{1.16} + 1.37 \left(\frac{1}{X_{tt}} \right)^{0.86} \quad (2-18)$$

این رابطه شامل دو بخش، شامل ناحیه جوشش هسته‌ای اشباع و جابه‌جایی اجباری است. E و h_{cb} بترتیب کمیت انتقال حرارت جابه‌جایی و کمیت افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری است و کمیت انتقال حرارت جابه‌جایی از معادله دیتوس بولتر و E از معادله ۲-۱۷ محاسبه می‌شوند. h_{nb} و S بترتیب کمیت انتقال حرارت و افزایش انتقال حرارت در جوشش هسته‌ای هستند و کمیت انتقال حرارت در جوشش هسته‌ای از معادله ۲-۱۹ و S از معادله ۲-۱۸ محاسبه می‌شوند.

$$h_{nb} = 55 P_r^{0.12} (-\log_{10} P_r)^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.67} \quad (2-19)$$

در این معادله M وزن مولکولی، q فلاکس گرمایی و $P_r = \frac{P_{sat}}{P_{cri}}$ فشار نسبی هستند.

همچنین جگر و وینتتون معادله دیگری ۲-۲۰ بمنظور بدست آوردن کمیت انتقال حرارت جریان جوششی در لوله‌های عمودی معرفی کردند. h_f کمیت انتقال حرارت جابه‌جایی است و از معادله دیتوس بولتر محاسبه می‌شود.

$$h_{Tp} = h_f \left(1 + 3000 BO^{0.86} + 1.12 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.75} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.41} \right) \quad (2-20)$$

¹ Gunger & Winterton

۲-۵-۳- رابطه لیو و وینتتون^۱

معادله دیگری ۲-۲۱ را لیو و وینتتون [۶۱] با استفاده از معادله چن را معرفی کردند.

$$h_{Tp} = (Sh_{nb})^2 + (Fh_{cb})^2 \quad (2-21)$$

این معادله شامل دو بخش، شامل ناحیه جوشش هسته‌ای اشباع و جابجایی اجباری است. F و h_{cb} بترتیب کمیت انتقال حرارت جابه‌جایی و کمیت افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری است، کمیت انتقال حرارت جابه‌جایی از معادله ۲-۷ و F از معادله ۲-۲۲ محاسبه می‌شوند. h_{nb} و S بترتیب کمیت انتقال حرارت و افزایش انتقال حرارت در جوشش هسته‌ای هستند و کمیت انتقال حرارت در جوشش هسته‌ای از معادله ۲-۸ و S از معادله ۲-۲۳ محاسبه می‌شوند.

$$F = \left(1 + xPr \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} - 1 \right) \right)^{0.35} \quad (2-22)$$

$$S = (1 + 0.055F^{0.1}Re_f^{0.016})^{-1} \quad (2-23)$$

۲-۵-۴- رابطه شاه

با توسعه معادلات جوشش جریانی اشباع، شاه [۶۲] برای جریان جوششی زیراشباع درون فضای بین دو لوله هم‌مرکز، رابطه‌ای معرفی کرد. شاه دو منطقه برای جوشش زیراشباع معرفی کرد: مناطق جوشش زیراشباع پایین و بالا. هنگامی که جریان در منطقه جوشش زیراشباع پایین باشد، افزایش دمای مادون‌سرد اثری روی دمای سطح نداشته اما هنگامی که جریان در منطقه جوشش زیراشباع بالا باشد، افزایش دمای مادون‌سرد، کاهش دمای سطح رو در پی داد. بمنظور تعیین منطقه جریان رابطه ۲-۲۴ معرفی کرد [۶۲].

¹ Liu & winterton

$$\varphi = \frac{q}{\Delta T_{sat} h_l} = \varphi_0 + \frac{\Delta T_{sc}}{\Delta T_{sat}} \quad (2-24)$$

q فلاکس گرمایی وارد شده، ΔT_{sc} دمای زیراشباع مایع و ΔT_{sat} دمای سوپرهیت سطح و تعاریف آن‌ها در زیر آمده است:

$$\Delta T_{sc} = T_{sat} - T_b \quad (2-25)$$

$$\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat} \quad (2-26)$$

T_b دمای بالک مایع و T_{sat} دمای اشباع مایع در فشار متناظر آن است. h_l کمیت انتقال گرما در جریان تک‌فاز است. همچنین کمیت φ_0 طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۶۲]:

$$\varphi_0 = \left(\frac{q}{\Delta T_{sat} h_l} \right)_{x=0, \Delta T_{sc}=0} \quad (2-27)$$

همانطور که در شکل ۲-۲ دیده می‌شود، نواحی مناطق مادون سرد بالا و پایین به وسیله نمودار رابطه ۲-۲۷ از هم جدا شده‌اند و می‌توان گفت هرگاه $\frac{\Delta T_{sc}}{\Delta T_{sat}} > 2$ برقرار شد، منطقه جریان حتماً بالا است و

هرگاه $\frac{\Delta T_{sc}}{\Delta T_{sat}} < 2$ برقرار شد منطقه جریان پایین است به شرطی که معادله ۲-۲۸ را ارضا کند [۶۲]:

$$\frac{\Delta T_{sc}}{\Delta T_{sat}} \geq 6.3 \times 10^4 BO^{1.25} \quad (2-28)$$

رابطه (۲-۲۹) را شاه برای جوشش زیراشباع بالا ارائه دادند [۶۲]:

$$q = h_l(T_w - T_b) + h_l(\varphi_0 - 1)(T_w - T_{sat}) \quad (2-29)$$

این رابطه شامل دو بخش، بخش اول به انتقال گرمای جابه‌جایی و بخش دوم به انتقال گرمای جوشش هسته‌ای مربوط است. شاه برای بدست آوردن h_l معادله ۲-۷ را به کار برد. همچنین کمیت φ_0 براساس مقدار عدد جوشش از روابط زیر بدست می‌آیند [۶۲]:

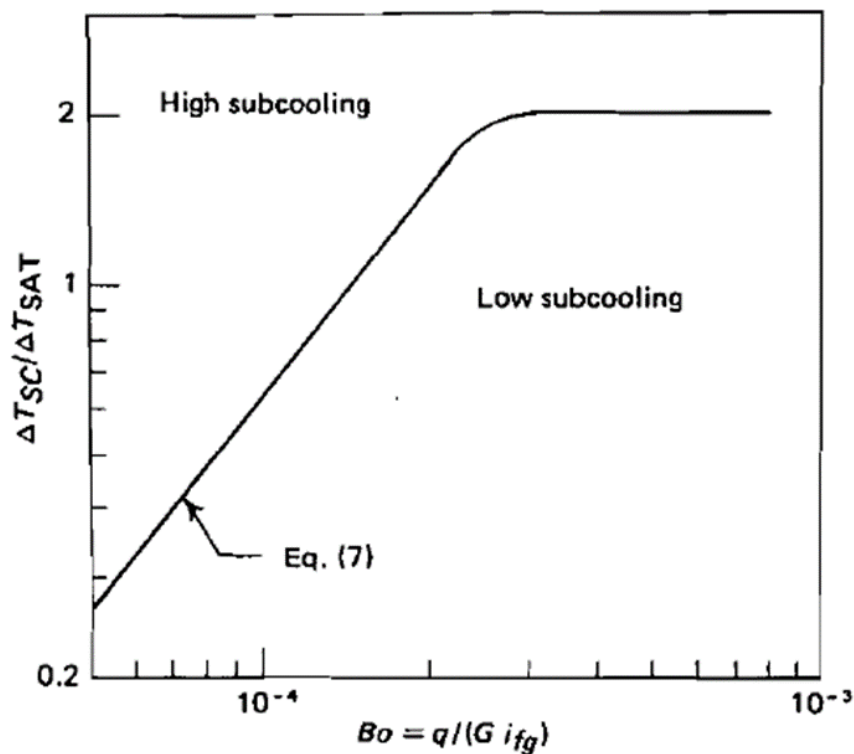
$$\varphi_0 = 230 BO^{0.5} \quad BO > 0.3 \times 10^{-4} \quad (2-30)$$

$$\varphi_0 = 1 + 46 BO^{0.5} \quad BO < 0.3 \times 10^{-4} \quad (2-31)$$

در روابط بالا BO عدد جوشش است و از طریق معادله ۲-۳۲ بدست می‌آید. q فلاکس گرمایی دریافتی مایع، G شار جرمی و h_{fg} آنتالپی تبخیر تعریف شده‌اند.

$$BO = \frac{q}{\rho u h_{fg}} \quad (2-32)$$

$$G = \rho u \quad (2-33)$$



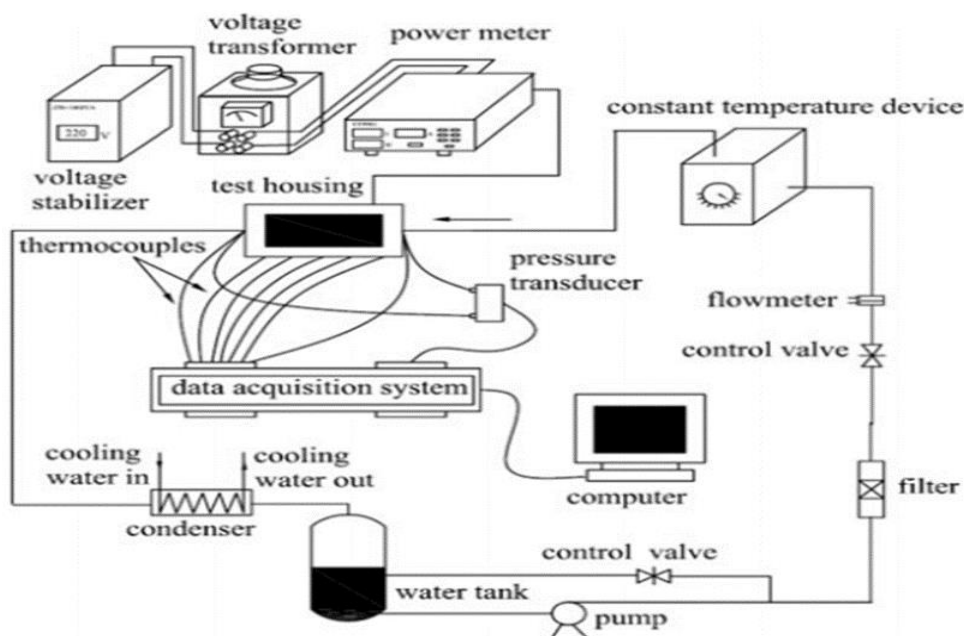
شکل ۲-۲: مرز بین جوشش مادون‌سرد پایین و بالا [۶۲]

۲-۶- پیشینه پژوهش استفاده از فوم‌های فلزی

به‌منظور بهبود ضریب انتقال حرارت، پژوهشگران همواره در جستجوی راه‌هایی مختلف و نوآورانه‌ای هستند. یکی از راه‌های افزایش نرخ انتقال حرارت استفاده از فوم‌های فلزی با تخلخل بالا در کانال‌هاست، که باعث افزایش سایت‌های جوشش می‌شود [۶۸]. لو و ژائو [۷۸] به بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت جوشش در لوله‌های پر شده از فوم مسی در حالت افقی پرداختند. در این کار از

فوم‌های مسی با تراکم حفره ۲۰ و ۴۰ ppi^۱ استفاده شد. نتایج نشان داد، استفاده از فوم فلزی با حفره‌های کوچکتر باعث ایجاد جریان قویتر شده که ناشی از کاهش اندازه حفره‌هاست و میزان انتقال حرارت تقریباً دو برابر می‌شود. همچنین به بررسی اثر شارحرارتی، دبی جرمی و افت فشار بر انتقال حرارت جوشش در لوله‌های پر شده از فوم فلزی پرداختند. ژیان‌بینگ جی و جین لیانگ [۷۹] به صورت آزمایشگاهی به بررسی افت فشار دو فازی در فوم‌های مسی پرداخته‌اند. در این کار از کانال مستطیلی و آب یونیزه شده به عنوان سیال استفاده شده است و دمای ورودی آب از ۴۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد تغییر کرده است. در این کار از فوم مسی با تخلخل ۰/۸۸ و تراکم حفره‌ها ۳۰، ۶۰، و ۹۰ ppi استفاده شد. همانطور که در شکل ۲-۳ شماتیک آزمایش شامل سیستم تامین مایع، گرمکن، کانال با مقطع مستطیلی (کانال در ابعاد ۳×۸×۵۲ mm سائز مورد استفاده قابل مقایسه با چیپ‌های الکترونیکی با نسبت طول به عرض بزرگتر) با فوم مسی دیده می‌شود. در این کار جریان مایع تک فاز، جریان جوشش دو فازی و تاثیر دبی‌های جرمی، کیفیت بخار و میانگین قطر حفره فوم‌های فلزی بر این جریان‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که افت فشار برای جریان جوشش دو فازی با افزایش پارامترهای کیفیت بخار خروجی، دبی جرمی و مقدار ppi افزایش می‌یابد.

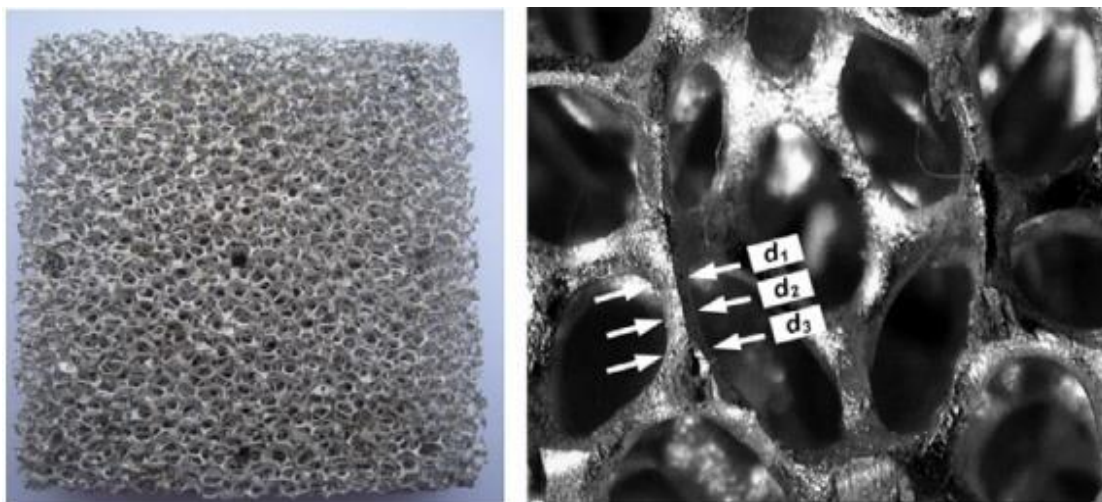
¹ Pores per inch



شکل ۲-۳: شماتیک آزمایش شامل سیستم تامین مایع، گرمکن، کانال با مقطع مستطیلی [۷۹]

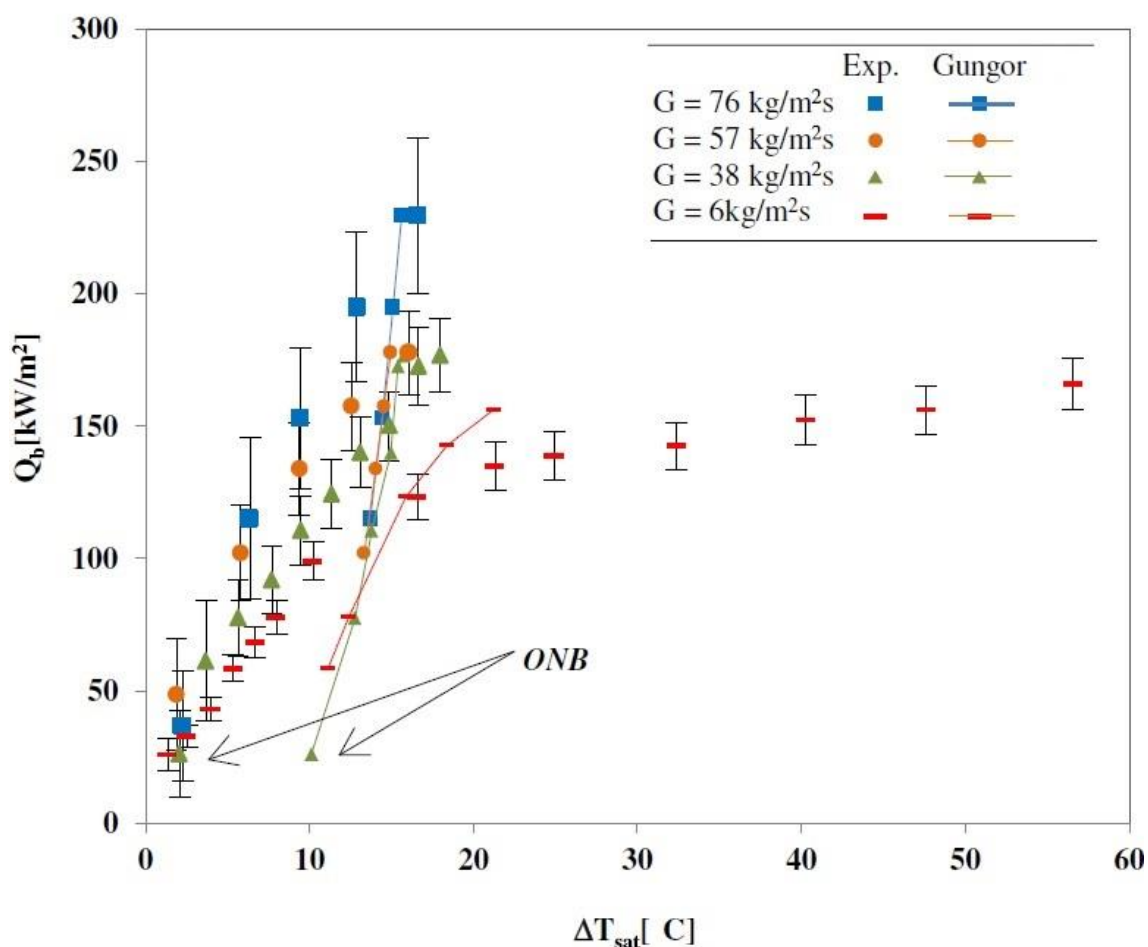
لی و لیونگ [۸۰] به تحقیق درباره ویژگی‌های جوشش جریان آب و مبرد در محیط متخلخل و با استفاده از دستگاه آزمایشگاهی به بررسی فرایند انتقال حرارت جوشش جریانی و شروع جوشش هسته‌ای پرداختند. همچنین با روش عددی شبیه‌سازی انجام شده و نتایج با داده‌های آزمایش‌ها مقایسه شده‌اند. قطر حفره‌های فوم آلومینیومی ۴۰ PPI به کار رفته شده در آزمایش‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ اندازه گیری شده که در شکل ۲-۴ دیده می شود.

¹ Scanning electron microscope



شکل ۲-۴: نمونه ای از فوم آلومینیومی به کار رفته [۸۰]

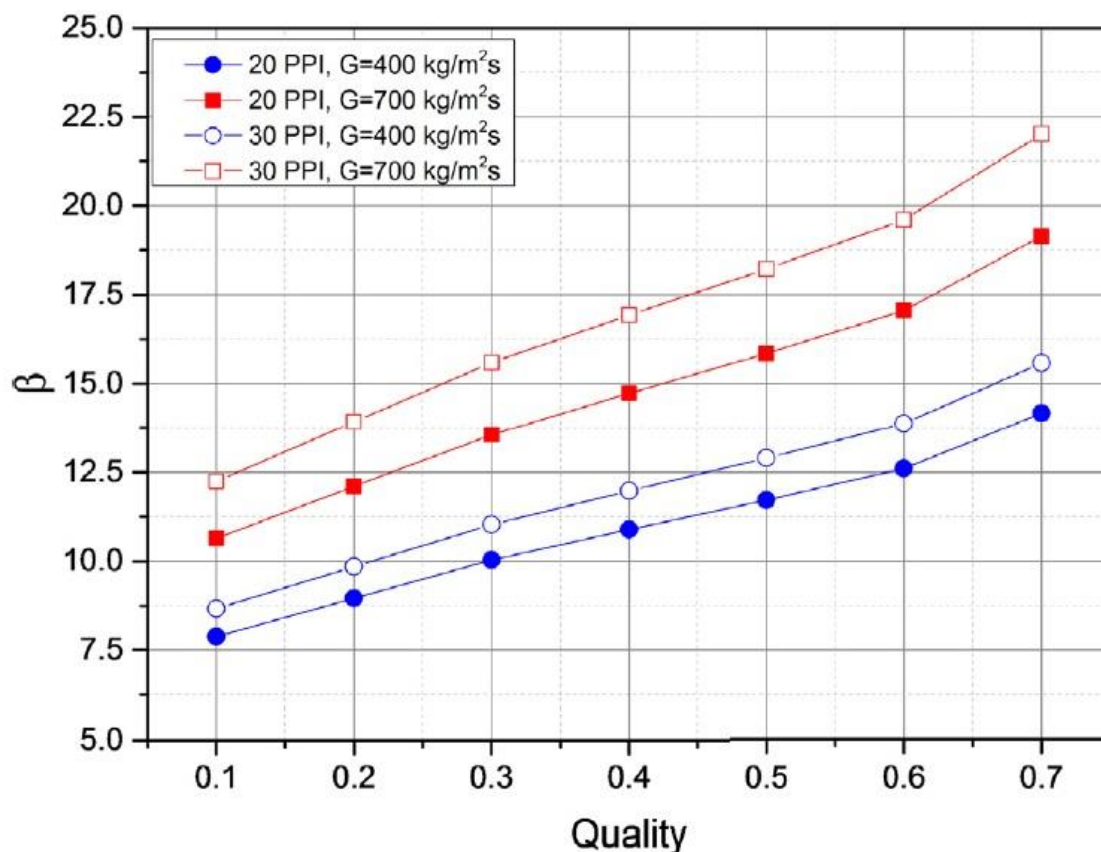
براهیم مدنی و توپین [۸۱] به بررسی انتقال حرارت جریان جوشش بالارونده در داخل کانال پر شده از فوم فلزی پرداخته‌اند. نمونه‌های فوم فلزی آزمایش شده از جنس مس با ۳۶ ppi و n-pentane به عنوان سیال استفاده شده است. نتایج گرمایی با نتایج شاه و وینترتون مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از محیط متخلخل ضریب انتقال حرارت برای کیفیت‌های پایین، ۲-۴ برابر افزایش می‌یابد و با افزایش کیفیت خروجی، ضریب انتقال حرارت جوشش کاهش می‌یابد. پروفیل دما و ضریب انتقال حرارت با نتایج لوله های صاف آنالیز و مقایسه شده‌اند. نمودارهای جوشش آزمایش‌ها در شکل ۲-۵ نشان می‌دهد که استفاده از فوم فلزی باعث کاهش نقطه شروع جوشش هسته‌ای به اندازه ۱۰ درجه نسبت به حالت بدون حضور فوم فلزی شده است.



شکل ۵-۲: نمودار جوشش آزمایش‌ها در مقایسه با معادله گانگر-وینترتون [۸۱]

هو و ژو [۸۲-۸۳] در مطالعاتشان به بررسی اثر استفاده از فوم فلزی و همچنین تاثیر قطر لوله روی افت فشار و خصوصیات انتقال گرما جوشش جریان‌ی مخلوط روغن و مبرد در لوله پر شده از محیط متخلخل پرداخته‌اند. عبادی و همکاران [۸۴] با پر کردن لوله‌های از محیط متخلخل فلزی به بررسی تاثیر فوم فلزی بر الگوهای جریان، ضریب انتقال حرارت و افت فشار پرداخته و همچنین به آشکارسازی جریان جوششی برای کیفیت بخار متوسط $0.1 - 0.7$ پرداخته‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از فوم فلزی الگوی جریان را تغییر نمی‌دهد، اگرچه ممکن است تعریف مرسوم هر الگوی جریان را تغییر دهد. به‌منظور مقایسه داده‌ها از دو پارامتر فاکتور بهبود، که نسبت انتقال حرارت لوله در دو حالت پر و خالی از فوم فلزی بود، و نسبت افت فشار، نسبت افت فشار لوله در دو

حالت پر و خالی از فوم فلزی، استفاده کردند. نتایج نشان داد استفاده از فوم فلزی باعث افزایش فاکتور بهبود تا ۳/۲ شد. یکی از دلایل افزایش ضریب انتقال حرارت را افزایش سطح انتقال حرارت معرفی کردند و همچنین نقش گذار الگوی جریان از جریان متناوب به جریان حلقوی، در همان شار جرمی و کیفیت بخار، به دلیل استفاده از فوم فلزی قابل چشم پوشی نیست. همچنین نتایج در شکل ۶-۲ برای پارامتر دیگر از افزایش نسبت افت فشار تا ۲۲ را نشان می‌داد.



شکل ۶-۲: نمودار نسبت افت فشار β برای لوله پر شده از فوم فلزی [۸۴]

غلامرضا بامروت عبادی و همکاران [۸۵] در ادامه کار قبلی، داده‌های آزمایشگاهی را با معادلات گسترش یافته لوله‌های پر شده با فوم فلزی مقایسه کردند. مانسین و همکارانش [۸۷-۹۰] با استفاده از جریان اجباری هوا به بررسی عملکرد گرمایی فوم‌های آلومینیومی و مسی گرم شده پرداختند. نتایج آنها نشان داد که هم مساحت سطح و هم بازده سطح باله‌دار فوم نقش مهمی در عملکرد کل انتقال

حرارت ایفا می‌کنند. ضریب انتقال حرارت با نرخ جریان جرمی هوا افزایش می‌یابد و افت فشار با چگالی منافذ افزایش می‌یابد. همچنین اثر ارتفاع حفره فوم‌ها بر عملکرد انتقال حرارت برای فوم آلومینیومی ۲۰ ppi نیز مورد بررسی قرار گرفت. دیانی و همکاران [۹۱] به بررسی پدیده تغییر فاز سیال‌های R134a، R1234yf و R1234ze(E) در یک کانال پر شده با فوم فلزی Δp_{pi} پرداختند. نتایج آنها نشان داد که انتقال حرارت تا ۴/۸ برابر در شار جرمی کم، شارحرارتی کم و کیفیت بخار بالا افزایش می‌یابد. همچنین در تمام موارد، افت فشار با کیفیت بخار یا شار جرمی افزایش می‌یابد. در کارهای گذشته بیشتر به بررسی اثر استفاده از فوم و محیط متخلخل در لوله پرداخته شده، در صورتی که یکی از رایج‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های انتقال حرارت غیرمستقیم، استفاده از سیستم‌های مبدل حرارتی پوسته لوله^۱ می‌باشد. به‌همین دلیل در کار حاضر با ساخت دستگاه آزمایشگاهی اثر استفاده از فوم فلزی بر جریان مادون سرد در بین دو لوله هم مرکز عمودی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به‌منظور مشاهده و درک بهتر جریان جوشش، لوله بیرونی شفاف در نظر گرفته شد.

۷-۲- ضرورت و اهداف

جوشش مادون سرد در راکتورهای هسته ای و بویلرهای با ارتفاع کم از اهمیت ویژه ای برخوردار است. از آنجایی که جریان سیال درون فضای حلقوی می‌تواند با سطح هر دو لوله مبادله انتقال حرارت انجام دهد و هر یک از دو سطح می‌توانند دارای شرایط مرزی متفاوت باشند، لذا این مسئله از لحاظ علوم حرارتی دارای اهمیت و پیچیدگی خاص خود می‌باشد. با اعمال شرایط مرزی روی لوله‌ها به طور دلخواه می‌توان به درک بهتری از انتقال حرارت دست یافت. همچنین اهمیت کاربرد فوم فلزی در بهبود مکانیسم انتقال حرارت جریان جوشش، انگیزش اصلی این مطالعه است و هدف اصلی این مطالعه بررسی تاثیر استفاده از فوم فلزی بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد آب در بین دو

¹Shell and Tube Heat Exchanger

لوله هم مرکز عمودی در دبی‌های جرمی پایین و محدوده جریان آرام بوده و با بدست آوردن ضریب جابجایی گرمایی در شرایط مختلف آزمایش و تحت اثر پارامترهای شارجرمی، شارحرارتی و دمای مادون‌سرد ورودی با حضور محیط متخلخل و یا لوله خالی از فوم فلزی، تحقیق روی انتقال حرارت جریان جوششی مادون‌سرد انجام شد. همچنین به منظور آشکار سازی جریان جوشش مادون‌سرد از لوله خارجی شفاف استفاده شده است. در پایان نتایج آزمایش‌ها با روابط شاه که به‌منظور پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت جریان جوششی مادون‌سرد آورده شده مقایسه و اعتبارسنجی شدند.

۲-۸-نوآوری

با توجه به اهمیت بالای انتقال حرارت جوشش مادون‌سرد در فضای بین لوله‌ها و همچنین کاربرد فوم فلزی در بهبود مکانیسم انتقال حرارت جریان جوشش و نبود حل عددی جامع، از نبود داده‌های آزمایشگاهی کافی در این زمینه ناشی می‌شود. تاکنون نگرش آزمایشگاهی به طور غالب برای مطالعه انتقال حرارت دو فازی در فوم‌های فلزی استفاده شده است [۸۱]. در تحقیق حاضر به مطالعه انتقال حرارت جوشش جریان مادون‌سرد تحت تاثیر پارامترهای مختلف در فضای بین دو لوله هم‌مرکز پرداخته‌ایم. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته انتقال حرارت جریان جوشش مادون‌سرد در شارحرارتی ثابت در فضای بین دو لوله هم‌مرکز و شار جرمی پایین و با وجود توانایی آشکارسازی تا الان صورت نگرفته و تحقیقات اصولی در این مورد نیاز می‌باشد. همچنین برای اولین بار به بررسی اثر استفاده از فوم فلزی بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون‌سرد آب در بین دو لوله هم‌مرکز عمودی در محدوده جریان آرام، تحت تاثیر پارامترهای مختلف پرداخته شده است.

فصل سوم: لوازم و تجهیزات

آزمایشگاهی

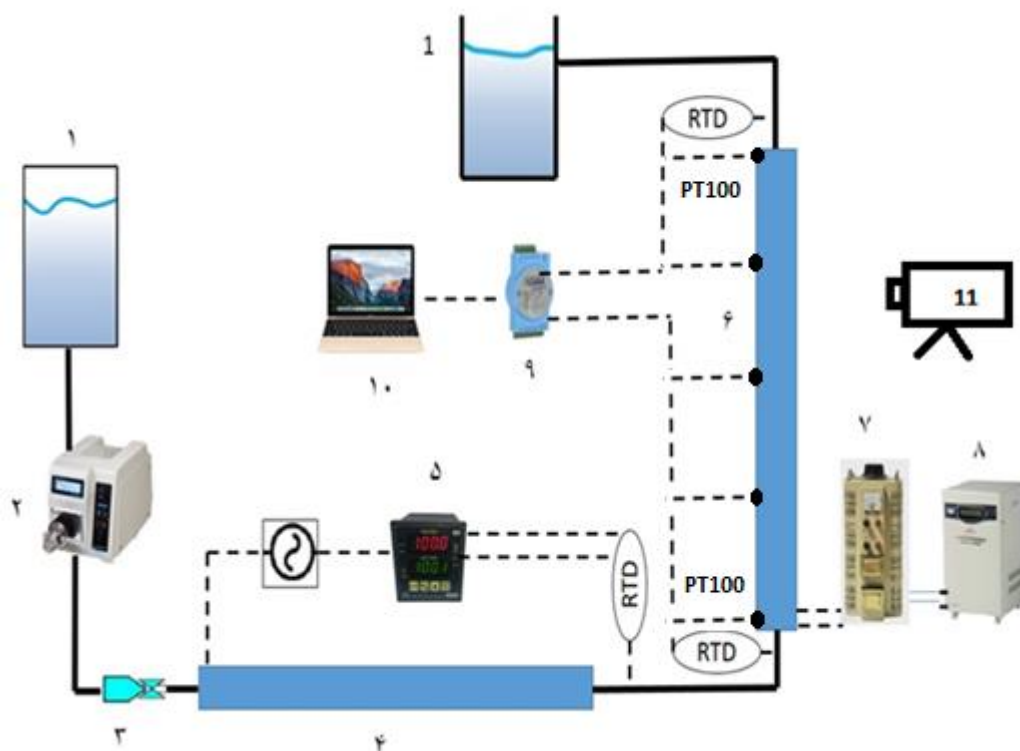
۳-۱- مقدمه

اکثر پژوهش‌های نظری محققان روی فرایند جوشش و عوامل موثر بر آن، بر مبنای نتایج آزمایشگاهی بوده است. همچنین بخاطر پیچیده بودن فرایند جوشش، تلاش‌های صورت گرفته منجر به مدل‌سازی فراگیر این فرایند نشده است. می‌توان گفت تحقیقات آزمایشگاهی روی فرایند جوشش عمومیت بیشتری دارد. انگیزش اصلی این مطالعه، به وسیله اهمیت کاربرد فوم فلزی در بهبود مکانیسم انتقال حرارت جریان جوشش ایجاد شد و هدف اصلی این مطالعه بررسی تاثیر استفاده از فوم فلزی بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد آب در بین دو لوله هم مرکز عمودی در دبی‌های جرمی پایین و محدوده جریان آرام بوده و با تغییر متغیرهایی مانند فلاکس گرمایی، دبی جرمی و دمای مادون سرد ورودی، اثر آن‌ها را بر ضریب انتقال حرارت جریان جوششی مادون سرد بررسی می‌شود.

در فصل حاضر دستگاه طراحی شده، لوازم استفاده شده و طریقه انجام آزمایش‌ها به منظور تحقیق روی انتقال حرارت و عوامل موثر بر آن معرفی می‌شود.

۳-۲- نمای کلی دستگاه آزمایش

دستگاه مورد آزمایش شامل: منبع آب یونیزه شده، پمپ، پیش گرمکن، بخش آزمون و وسایل لازم برای اندازه‌گیری و کنترل می‌باشد. در شکل ۳-۱ تصویر شماتیک و نمای کلی بستر آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۱: طرح شماتیک دستگاه آزمایش: ۱- مخزن آب ۲- پمپ ۳- دبی سنج ۴- پیش گرمن ۵- کنترل کننده ۶- بخش آزمون ۷- تنظیم کننده ولتاژ ۸- تثبیت کننده ولتاژ ۹- دستگاه ثبت داده ۱۰- کامپیوتر جهت نمایش داده ۱۱- دوربین



(ب)



(الف)



(د)



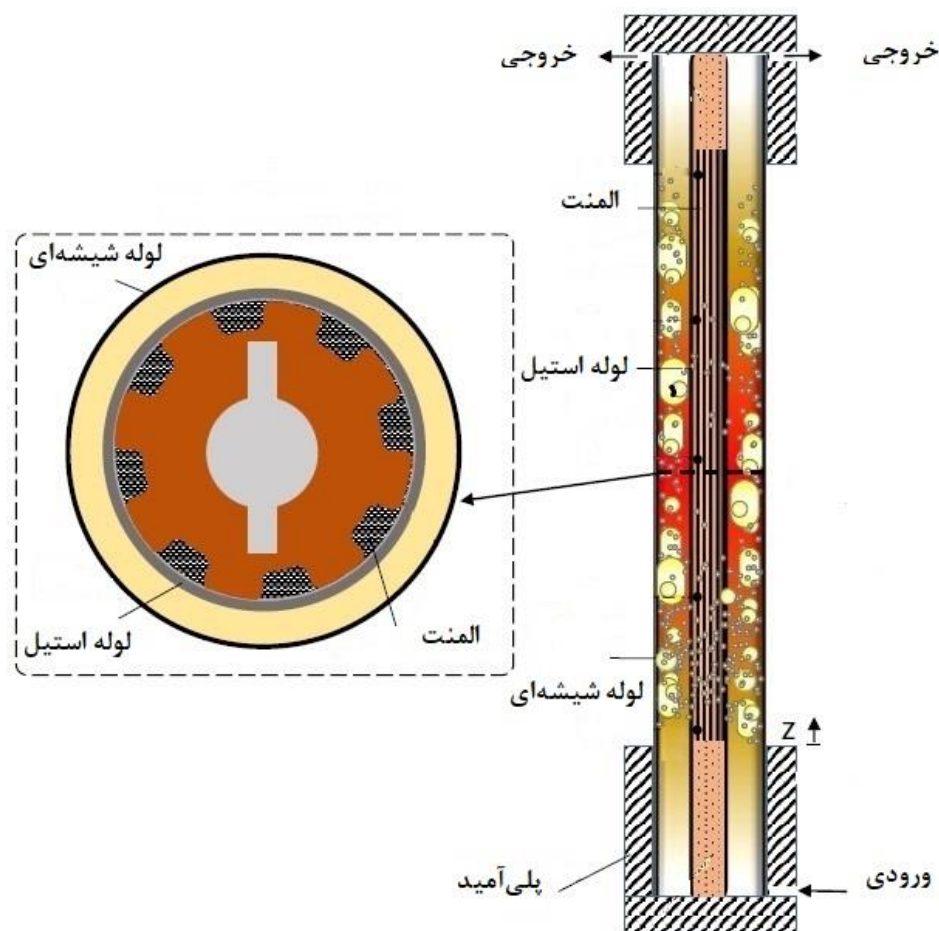
(ج)

شکل ۳-۲: الف) نمای کلی دستگاه آزمایش، ب) مخازن ذخیره آب و پیش‌گرم، ج) ست‌آپ جریان جوشش، د) محل قرارگیری دوربین و داده‌بردار

۳-۳- تجهیزات مورد استفاده

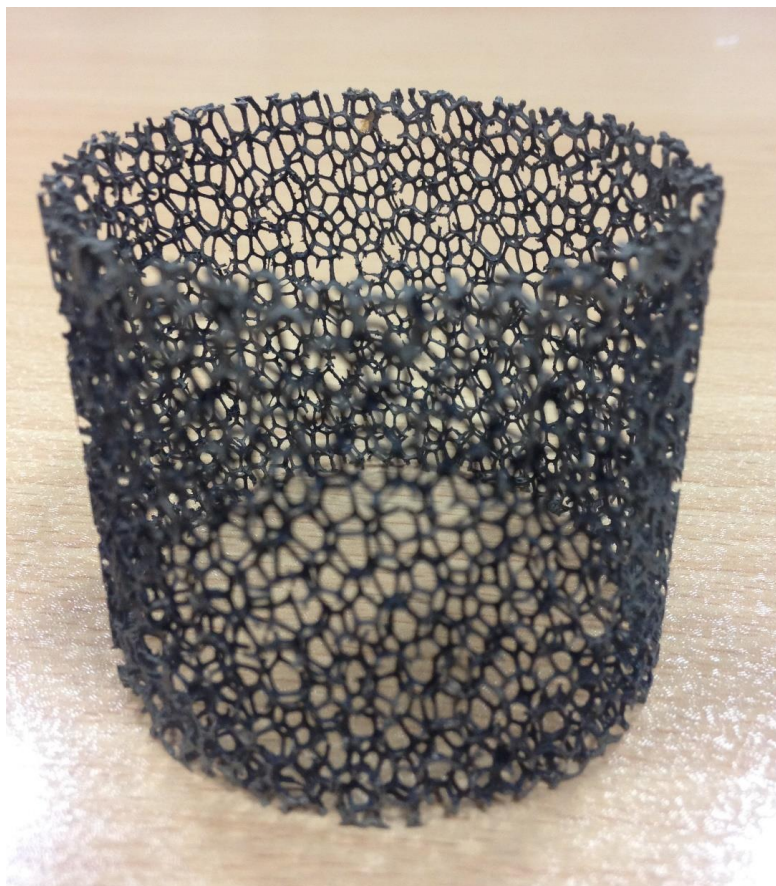
۳-۳-۱- بخش آزمون

همانطور که در شکل ۳-۳ مشاهده می‌شود، قسمت آزمون و محل سنسورها مشخص شده است، قسمت آزمون تشکیل شده از دو لوله هم‌مرکز عمودی که لوله داخلی از جنس فولادی نسوز با هدایت گرمایی 34 w/mK به طول $1/5$ متر، قطر خارجی $50/7$ میلی‌متر و ضخامت 1 میلی‌متر است. لوله خارجی از سه قسمت تشکیل شده و همچنین بخاطر مشاهده جوشش جریانی در بخش میانی دستگاه آزمایش، لوله شفاف نسوز به طول 60 سانتی‌متر و قطر داخلی $70/6$ میلی‌متر بکار برده شد. برای اینکه جریان مایع توسعه یافته شود ناحیه‌ای به طول 50 سانتی‌متر در ورودی بخش آزمون آزمایش‌ها به کار رفته است. به منظور ممانعت از تاثیر اغتشاش سیال و بخار بر داده‌های خروجی بخش آزمون، بخش پایانی دستگاه آزمایش به طول 30 سانتی‌متر به کار رفته است. همچنین برای عایق‌بندی بخش ابتدا و انتهای دستگاه آزمایش، به منظور عدم هدر دادن گرما، پلی‌آمید به کار رفته است. برای اعمال شار گرمایی یکنواخت مورد نیاز دستگاه آزمایش، در داخل لوله فولادی المنت الکتریکی به طول $0/6$ متر استفاده شده است و فضای خالی بین المنت الکتریکی و لوله داخلی را با اکسید منیزیم، به منظور پخش یکنواخت فلاکس گرمایی، پوشانده شده است.



شکل ۳-۳: طرح شماتیک بخش آزمون

به طور کلی مواد جامدی که در ساختارشان حاوی حفره و منفذ هستند به عنوان مواد متخلخل تعریف می‌شوند. یکی از مفاهیم مهمی که در مواد متخلخل مورد بررسی قرار می‌گیرد تخلخل می‌باشد. تخلخل از تقسیم حجم حفره‌ها به حجم کلی ماده بدست می‌آید. حفره‌ها موجود در مواد متخلخل به دو نوع حفره باز و حفره بسته تقسیم می‌شوند. حفره باز به سطح ماده دسترسی دارند ولی حفره بسته در درون ماده محبوس هستند. به طور کلی مساحت سطحی ماده متخلخل بالاتر از ماده غیرمتخلخل می‌باشد. ماده متخلخل به کار رفته از نوع حفره باز و در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است. در این نوع ماده متخلخل، حفره‌ها بصورت پیوسته به یکدیگر متصل می‌شوند و دارای قابلیت عبور سیال از میان حفره‌های خود می‌باشند. فوم فلزی به کار رفته از جنس نیکل با ۱۰ ppi و تخلخل ۹۵٪ با قطر داخلی ۷۰/۶ و ضخامت ۶ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۳-۴: فوم فلزی به کار رفته از جنس نیکل با ۱۰ ppi و تخلخل ۹۵٪

۳-۳-۲-پمپ

به منظور تحصیل اطمینان از یکنواختی و دقت در اندازه دبی آزمایش‌ها از یک عدد میکرو پمپ چرخ‌دنده‌ای^۱ از برند لانگر پمپ^۲ مدل WT3000-1FB با سرعت ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و دبی ۱۷۱ تا ۱۷۱۴ میلی‌لیتر بر دقیقه به کار برده شده است. سرعت و دبی را می‌توان صورت دستی یا اتوماتیک کنترل کرد. دقت این نوع پمپ ± 0.1 میلی‌لیتر بر دقیقه است و قابلیت تحمل دما از ۲۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد را دارد.

¹Micro-Gear pump

² Longer pump



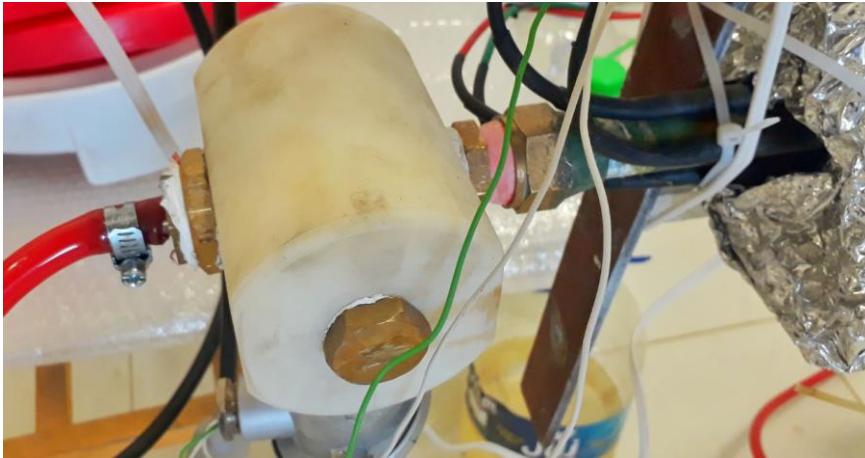
شکل ۳-۵: پمپ چرخ‌دنده میکرو لانگر مدل WT3000-1FB

۳-۳-۳-۳- اتصالات

همانطور که در شکل ۳-۶ دیده می‌شود، برای اندازه‌گیری دما و فشار سیال در ابتدا و انتهای قسمت آزمون و پیش‌گرمکن، حس‌گرهای دما و فشار را روی اتصالاتی از جنس پلی‌آمید تعبیه کرده و قسمت‌های مختلف به هم متصل شده‌اند.

۳-۳-۳-۴- عایق حرارتی

همانطور که در شکل ۳-۷ نمایش داده شده، از عایق‌بندی دستگاه با پشم‌شیشه برای جلوگیری از هدر رفت گرمایی دستگاه آزمایش استفاده شده است.



شکل ۳-۶: اتصالات پلی آمید



شکل ۳-۷: عایق حرارتی

۳-۳-۵- سنسور دما

دمای آب و سطح لوله فولادی با کمک دو نوع سنسور اندازه‌گیری شده‌اند، در ادامه این دو نوع سنسور را معرفی می‌شوند.

۳-۳-۵-۱- سنسور دمای سیال

برای اندازه‌گیری دمای آب، در ابتدا و انتهای قسمت آزمون دستگاه آزمایش، دو عدد سنسور PT100 ساخت شرکت جومو^۱ آلمان نصب شده است. دقت این نوع سنسور ± 0.1 درجه سانتی‌گراد می‌باشد و توانایی متصل شدن همزمان به دستگاه ثبت داده^۲ و واپایشگر^۳ را دارد. در شکل ۳-۸ نمای از حس‌گر دمای سیال قابل مشاهده است.



شکل ۳-۸: سنسور اندازه‌گیری دمای آب از نوع PT 100 پراب دار

۳-۳-۵-۲- سنسور دمای سطح

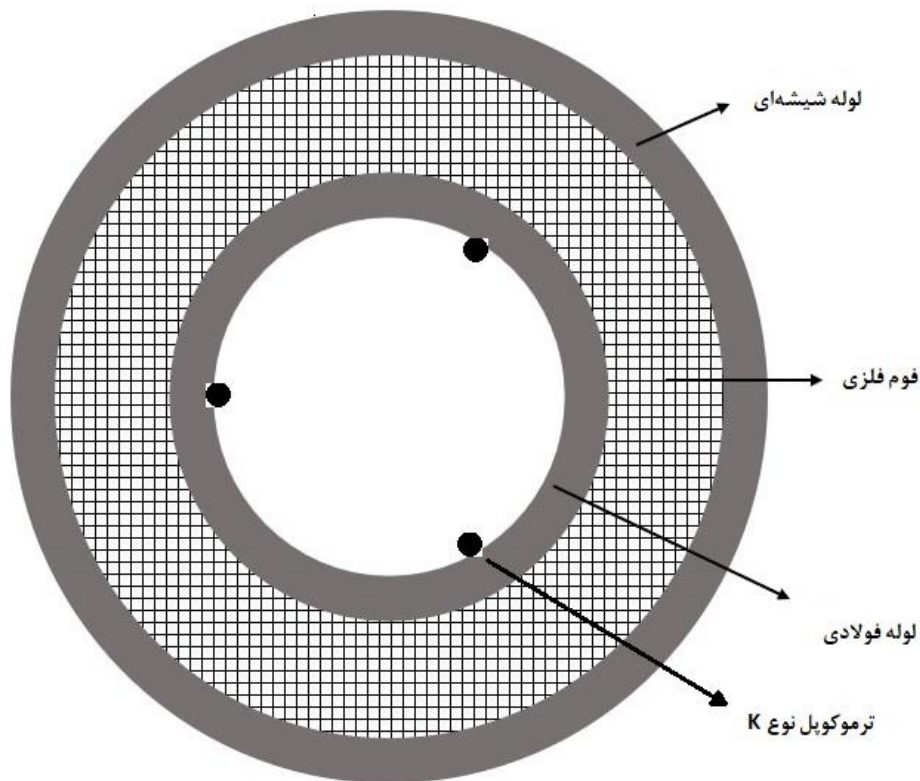
اندازه‌گیری دمای سطح داخلی لوله داخلی دستگاه آزمایش با کمک ۱۵ عدد ترموکوپل انجام می‌شود. ترموکوپل‌های به کار رفته از نوع k با محدوده دمایی ۱۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و در ۵ مقطع از لوله فولادی نصب شده‌اند و همانطور که در شکل ۳-۹ مشاهده می‌شود در هر مقطع ۳ سنسور که نسبت به هم زاویه ۱۲۰ درجه دارند. به منظور ثبت داده‌های دمای ترموکوپل‌های نوع k از

¹ Jumo

² Data Acquisition Unit

³ PID Controller

۲ عدد دستگاه ثبت داده آدام ۶۰۱۸ استفاده شده است که هر کدام از آنها دارای ۸ کانال می‌باشد. داده‌ها توسط این دستگاه‌ها در طول زمان آزمایش روی کامپیوتر ذخیره شده‌اند. شکل ۳-۲ محل قرار گرفتن سنسورها در فواصل مساوی ۱۵ سانتی‌متری از ابتدای ورودی بخش آزمون را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۹: شماتیکی از مقطع لوله و محل نصب سنسورهای نوع k

۳-۳-۶- حس گر فشار

دو عدد سنسور فشار در ابتدا و انتهای قسمت آزمون دستگاه آزمایش برای اندازه‌گیری فشار سیال نصب شده است. سنسورهای فشار ویکا از نوع a10، دامنه فشار ۰ تا ۱۰ بار و دقت $\pm 2/5$ میلی بار می‌باشند. با توجه به بالا بودن دمای خروجی سیال در بخش آزمون، یک سردکننده ویکا مدل ۹۱۰، ۲۴ به منظور کم کردن دمای آب ورودی به سنسور فشار به کار می‌گیریم. نمایی از سنسور فشار به همراه سردکننده در شکل ۳-۱۰ قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱۰: سنسور اندازه‌گیری فشار A-10

۳-۷- منبع تغذیه

دو منبع تغذیه ۵ kw امگا^۱ کره جنوبی برای فراهم کردن قدرت الکتریکی به المنت درون دستگاه آزمایش به کار گرفته شده است. از یک ثابت نگه‌دارنده به منظور اینکه ولتاژ ورودی به تنظیم کننده ولتاژ ثابت بماند استفاده شده، بطوریکه تنظیم کننده توانایی کنترل ولتاژ بین ۰ تا ۳۰۰ ولت را دارا می‌باشد. با توجه به اینکه جریان خروجی تنظیم کننده سینوسی می‌باشد، در نتیجه می‌توان به توان موثر آن برای بدست آوردن قدرت گرمایی اعمال شده اعتماد کرد. هر یک از المنت‌های درون لوله فولادی به یکی از منبع‌های تغذیه‌ها که در شکل ۳-۱۱ مشاهده می‌شود، وصل شده است.

¹ Omega

۳-۳-۸- کلمپ آمپر متر

در آزمایش‌ها از یک عدد کلمپ آمپر متر هیوکی ژاپن^۱ برای اندازه‌گیری شدت جریان به کار برده شد. طریقه استفاده از آن بدین گونه است که دهانه گیره مانند کلمپ به دور سیم فاز متصل به المنت قرار می‌گیرد و کلمپ میزان شدت جریان را نشان خواهد داد. دقت کلمپ در اندازه‌گیری ± 6 میلی‌آمپر می‌باشد. به منظور به دست آوردن میزان قدرت اعمالی به المنت‌ها، اندازه شدت جریان ورودی به هر المنت در ولتاژی که از طریق منبع تغذیه تنظیم شده، ضرب می‌شود. این کار برای هر یک از المنت‌ها انجام می‌شود.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱۱: منبع تغذیه (الف) تنظیم‌کننده ولتاژ (ب) ثابت‌کننده جریان

۳-۳-۹- پیش گرم کن

از یک پیش گرم کن برای بالا بردن دمای آب، به حد خواسته شده، پیش از ورود آب به بخش آزمون دستگاه آزمایش استفاده می‌شود. ۴ عدد المنت با توان کل ۶kw در پیش گرم کن که می‌تواند دمای آب را تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد بالا ببرد. به منظور جلوگیری از هدر رفت گرمایی و به حداقل

¹ Hioki

رساندن آن از پشم‌شیشه برای عایق‌بندی استفاده شده است. پیش‌گرمکن به کار رفته در آزمایش را در شکل ۱۲-۳ آورده شده است.



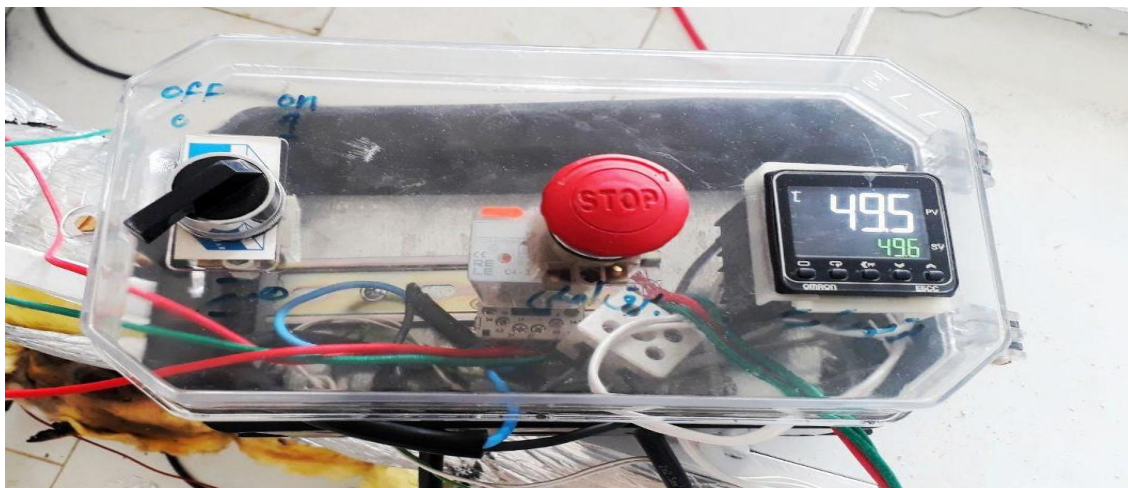
شکل ۱۲-۳: پیش گرم‌کن

۳-۱۰-۳- کنترل کننده دمای ورودی سیال

برای انجام صحیح و اطمینان از ثابت بودن دمای آب ورودی به قسمت آزمون دستگاه آزمایش، در خروجی پیش‌گرمکن یک کنترلر^۱ دما سه‌زمانه مدل امرن^۲ به کار برده شده است. طریقه کنترلر برای ثابت نگه داشتن دمای خروجی از پیش‌گرمکن بدین گونه است که با کنترل دمای خروجی با استفاده از سنسور دما تعبیه شده در ورودی بخش آزمون که به کنترلر وصل است و همچنین سیم خروجی جریان برق کنترلر از راه رله به المنت‌های پیش‌گرمکن وصل باشند. بعد از اینکه دمای مدنظر را برای کنترلر تعریف می‌شود، کنترلر با قطع و وصل جریان برق خروجی خود، دمای آب ورودی به بخش آزمون را کنترل می‌کند. شکل ۱۳-۳ مربوط به عکس کنترلر مورد استفاده در آزمایش‌ها می‌باشد.

^۱PID Controller

^۲ Omron



شکل ۳-۱۳: کنترل کننده دمای ورودی سیال

۳-۳-۱۱-دستگاه ثبت داده‌ها

۳-۳-۱۱-۱-دستگاه ثبت دما

بمنظور ثبت دما ورودی و خروجی بخش های مختلف دستگاه آزمایش، تمامی حس گرهای دما به دستگاه ثبت دما اتصال پیدا کرده‌اند. از رابط $4018+$ که توانایی متصل شدن ۸ حس گر را دارا می‌باشد برای ثبت دمای ترموکوپل‌ها به کار گرفته شده است. به‌منظور ثبت داده‌ها در رایانه از نرم‌افزار شرکت ادونتک به کار گرفته شده است. داده‌ها خروجی برای فشار بین بازه ۴ تا ۲۰ میلی‌آمپر می‌باشد. همچنین از رابط 4015 که توانایی متصل شدن ۶ حس گر را دارا می‌باشد برای ثبت دمای سیال به کار گرفته شده است. به‌منظور ثبت داده‌ها در رایانه، نرم‌افزار شرکت ادونتک با دقت 0.01 درجه سانتی‌گراد به کار گرفته شده است.

۳-۳-۱۱-۲-دستگاه ثبت فشار

بمنظور ثبت فشار و بدست آوردن افت فشار ناشی از جریان سیال، حس گرهای فشار به دستگاه ثبت فشار که توانایی ثبت داده‌های ۸ حس گر را دارند، متصل شده‌اند. به‌منظور ثبت داده‌ها در رایانه

نرم افزار شرکت ادونتک به کار گرفته شده است. داده ها خروجی برای فشار بین بازه ۴ تا ۲۰ میلی آمپر می باشد.

۳-۴-طریقه انجام آزمایش

به منظور کالیبره کردن پمپ یک استوانه درجه بندی شده با حجم ۲ لیتر و یک کرنومتر اندازه گیری زمان به کار گرفته شده است. در ابتدا میزان دبی خروجی پمپ را با کمک ولوم جای داده شده روی پمپ به مقدار در نظر گرفته شده رسانده و آب از مخزن به پیش گرم کن پمپ می شود و پس از آن وارد بخش آزمون می شود. پس از مدتی که تمام لوله ها و بخش های مختلف دستگاه آزمایش از آب پر شود، سپس ولتاژ مورد نظر را با استفاده از منبع تغذیه تنظیم کرده و المنت ها روشن می شوند. همچنین جریان برق گذرنده از هر المنت را با کمک کلمپ آمپر متر اندازه گیری کرده و مقدار توان اعمال شده به دستگاه محاسبه می شود. برای ثبت داده های سنسورهای دما و فشار، بعد از اینکه دستگاه ثبت داده را روشن و به کامپیوتر وصل کرده و با کمک نرم افزار ثبت داده، داده ها را در هریک ثانیه ثبت و ذخیره می شوند. با استفاده از کنترلر دما، دمای ورودی به بخش آزمون را مشخص و کنترل شده اند. طریقه کنترلر برای ثابت نگه داشتن دمای خروجی از پیش گرمکن بدین گونه است که با کنترل دمای خروجی با استفاده از سنسور دما تعبیه شده در ورودی بخش آزمون که به کنترلر وصل است و همچنین سیم خروجی جریان برق کنترلر از راه رله به المنت های پیش گرم کن وصل باشند. بعد از اینکه دمای مدنظر را برای کنترلر تعریف شد، کنترلر با قطع و وصل جریان برق خروجی خود، دمای آب ورودی به بخش آزمون را کنترل می کند. در طول آزمایش به خاطر نوسانات برق شهری، مقدار ولتاژ مورد نظر برای توان تعیین شده به وسیله منبع تغذیه تغییر داده شد. همچنین در طول آزمایش شدت جریان برق در المنت ها را به این دلیل که امکان دارد، مقاومت المنت تحت تاثیر دما تغییر کند، اندازه گرفته شده است. برای رسیدن به حالت پایا در هر یک از آزمایش ها،

دستگاه به مدت یک ساعت روشن می‌ماند، در آزمایش جریان تک‌فاز، زمانی که دمای خروجی آب بخش آزمون با طول زمان ثابت بماند، جریان پایا شده است، اما در آزمایش‌های جوشش زمانی که دمای جداره لوله در طول زمان ثابت بماند، جریان پایا شده است. در طول آزمایش‌ها با توجه به اینکه داده‌های دمای سیال و دیواره لوله ثبت می‌شود و منحنی تغییرات داده‌ها در طول آزمایش در دسترس است، هنگامی که منحنی تغییرات داده‌ها، نشان‌دهنده پایا بودن جریان باشد، آزمایش متوقف می‌شود. با اتمام آزمایش داده‌های دستگاه ثبت داده در کامپیوتر ذخیره می‌شود. پس از اتمام ذخیره داده‌ها و پایان آزمایش، برای اینکه به دستگاه آزمایش شوک وارد نشود، جریان الکتریکی وارد شده به پیش‌گرم‌کن و المنت‌ها را به تدریج کم شده تا به صفر برسد. برای خنک شدن تدریجی لوله و المنت‌ها جریان آب کماکان در دستگاه جریان دارد و با خنک شدن دستگاه، جریان سیال نیز متوقف می‌شود. برای جلوگیری از رسوب ذرات در دستگاه، جریان هوا با فشار زیاد توسط کمپرسور هوا به دستگاه تزریق می‌شود تا سیال باقی‌مانده نیز خارج شود.

ممکن است در طول آزمایش و در ارتباط با اندازه‌گیری تجهیزات خطاهایی پیش بیاید که به چند مورد اشاره شده است. هنگام تنظیم ولتاژ ممکن است برق شهر نوساناتی داشته باشد و ولتاژ تنظیم شده، تغییر کند که در مقدار شارحرارتی اعمالی تاثیر می‌گذارد. برای کنترل این خطا در طول مراحل آزمایش ولتاژ منبع تغذیه را تغییر داده می‌شد تا همواره ولتاژ بر روی ولتاژ موردنظر باشد. خطای دیگری که ممکن است پیش بیاید در قسمت کنترل کننده دمای ورودی سیال است که ممکن است با قطع و وصل کردن المنت‌ها دما به اندازه یک درجه از مقدار تنظیم شده روی کنترل‌کننده کمتر یا بیشتر شود. برای کنترل این خطا همیشه دمای تنظیم شده روی کنترل‌کننده به اندازه یک تا دو درجه بیش‌تر از دمای ورودی دلخواه به بخش آزمون تنظیم می‌شود تا افت دمای ناشی از قطع شدن المنت‌ها جبران شود. در بخش اصلی دستگاه نیز ممکن است مشکلاتی از قبیل نشتی اتصالات پیش بیاید که برای رفع آن از چسب مخصوص استفاده می‌شود.

فصل چہارم: نتائج

۴-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی و تشریح نتایج حاصل از آزمایش‌ها می‌پردازیم. در این بخش ابتدا شرایط آزمایش بیان شده و در ادامه به بررسی و تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف روی ضریب انتقال حرارت پرداخته می‌شود. سپس از لحاظ تئوری ضریب انتقال حرارت توسط رابطه شاه [۶۲] پیش‌بینی شده و با داده‌های تجربی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

۴-۲- شرایط آزمایش

در مطالعه حاضر با ساخت بستر آزمایشگاهی به بررسی تجربی تأثیر ماده متخلخل بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد در بین دو لوله هم مرکز عمودی با قطر داخلی و خارجی به ترتیب ۵۰/۷ و ۷۰/۶ میلی متر و سیال کاری آب پرداخته شده است. فوم فلزی به کار رفته از جنس نیکل با ۱۰ ppi و تخلخل ۹۵٪ می‌باشد و اثر پارامترهایی مانند شارحرارتی متغیر از ۵ تا ۳۰ کیلووات بر مترمربع، دبی حجمی بین ۷۰۰ تا ۱۷۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، رینولدز بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ و دمای مادون سرد ورودی °C ۵۰ و °C ۳۵ روی ضریب انتقال حرارت بررسی شده است. آزمایش در فشار اتمسفریک انجام شده و دمای محیط نیز در تمامی مراحل آزمایش °C ۲۳ می‌باشد. دمای اشباع آب در فشار اتمسفریک، °C ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. جدول ۱-۴ متغیرهای آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱: متغیرهای آزمایش

پارامتر	مقدار
مشخصات لوله	لوله عمودی از جنس فولاد نسوز، قطر خارجی ۵۰/۷
	میلی‌متر، ضخامت ۱ میلی‌متر و طول ۱/۵ متر
شارحرارتی اعمال شده	$30-5 (kW/m^2)$
دبی حجمی سیال	$700 - 1700 (ml/min)$
دمای مادون سرد ورودی	$35^{\circ}C$ و $50^{\circ}C$
سرعت سیال	$0.006 - 0.15 (m/s)$
رینولدز	$300-700$
فشار محیط آزمایشگاه	۸۶ KPa
دمای محیط آزمایشگاه	$22-27^{\circ}C$

۴-۳- آنالیز عدم قطعیت

آنالیز عدم قطعیت روی نتایج آزمایش‌ها انجام شده است. عدم قطعیت یک پارامتر که تابعی از چند متغیر می‌باشد و وابسته به عدم قطعیت آن متغیرها است. عدم قطعیت کلی نتایج اندازه‌گیری شده از فرمول زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (4-1)$$

طبق تعریف ذکر شده، عدم قطعیت نسبی شارحرارتی و ضریب انتقال حرارت از روابط ۲-۴ و ۳-۴ محاسبه می‌شوند. مقادیر بیشینه عدم قطعیت مولفه‌های مختلف آزمایش به طور خلاصه در جدول ۴-۲ آورده شده است [۱۲].

$$\frac{\partial \ddot{q}}{\ddot{q}} = \left[\left(\frac{\partial V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\partial I}{I} \right)^2 + \left(\frac{\partial D_o}{D_o} \right)^2 + \left(\frac{\partial L}{L} \right)^2 \right] \quad (4-2)$$

$$\frac{\partial h}{h} = \left[\left(\frac{\partial \ddot{q}}{\ddot{q}} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_w}{T_w - T_b} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_b}{T_w - T_b} \right)^2 \right] \quad (4-3)$$

جدول ۴-۲: مقادیر عدم قطعیت مولفه‌های تاثیرگذار مساله

عدم قطعیت	مولفه
±۰/۰۱	قطر لوله استیل (mm)
±۱	طول لوله استیل (mm)
±۰/۰۵	قطر لوله شیشه ای (mm)
±۰/۱٪	شار جرمی
±۰/۱	دما (°C)
۰/۱ ٪	ولتاژ
۰/۱ ٪	آمپر
۵٪	شارحرارتی
۷٪	ضریب انتقال حرارت محلی

۴-۴-معادلات حاکم بر مسئله

در محاسبات گرمایی جوشش جریانی مادون سرد، میزان اتلاف حرارتی دستگاه آزمایش لحاظ شده است. با توجه به محاسبه رینولدز بحرانی از رابطه ۴-۴ نتیجه می شود جریان در طول آزمایش در محدوده رینولدز کمتر از ۲۳۰۰ قرار دارد و جریان آرام می باشد.

$$Re_{cr} = 2300$$

$$Re = \frac{\rho u D_H}{\mu} \quad \text{جریان آرام} \quad Re < 2300 \quad (۴-۴)$$

$$Re > 2300 \quad \text{جریان آشفته}$$

که D_H قطر هیدرولیک می باشد و برای دو لوله هم مرکز برابر است با :

$$D_H = \frac{4 \left(\frac{\pi}{4} \right) (D_o^2 - D_i^2)}{\pi (D_o + D_i)} = D_o - D_i \quad (۵-۴)$$

D_o و D_i به ترتیب قطر داخلی و قطر خارجی بخش آزمون می باشند.

شارحرارتی اعمال شده طبق رابطه ۴-۶ محاسبه شده است.

$$Q_w = \frac{VI}{A} = \frac{VI}{\pi D_i L} \quad (۶-۴)$$

I و V به ترتیب اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت درون لوله و جریان الکتریکی را نشان می دهند. D_i

قطر داخلی و L طول گرم شده لوله داخلی است.

شارحرارتی گرفته شده توسط سیال از رابطه ۴-۷ محاسبه می شود:

$$\dot{q} = \frac{\dot{m} C_p}{\pi D_i L} (T_{out} - T_{in}) \quad (۷-۴)$$

که $\dot{m}$ معرف دبی جرمی، C_p ظرفیت گرمایی ویژه، D_i قطر خارجی لوله داخلی، T_{in} و T_{out} به ترتیب

دمای ورودی و دمای خروجی بخش آزمون می باشند. باید توجه داشت که در محاسبه شارحرارتی

گرفته شده توسط سیال، مقدار سطح در معادله ۷-۴، در آزمایش‌های بدون فوم فلزی و با حضور فوم

فلزی برابر با سطح بیرونی لوله فولادی در نظر می‌گیریم.

اتلاف حرارتی نیز از رابطه ۸-۴ به دست می‌آید:

$$Q_{\text{loos}} = \frac{VI - \dot{m}C_p(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})}{VI} \times 100 \quad (۸-۴)$$

h ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی بوده و از رابطه ۹-۴ محاسبه می‌شود:

$$h(z) = \frac{\dot{q}}{T_{W,O}(z) - T_b(z)} \quad (۹-۴)$$

در این رابطه z فاصله محوری از ورودی بخش آزمون، q شارحرارتی داده شده به سیال، $T_b(z)$ دمای

توده سیال در موقعیت محوری z می‌باشد که طبق رابطه ۱۰-۴ محاسبه می‌شود.

$$T_b(z) = T_{\text{in}} + \frac{q\pi D_o}{\dot{m}C_p} z \quad (۱۰-۴)$$

$T_{W,O}(z)$ دمای سطح خارجی لوله فولادی در فاصله محوری z که از رابطه ۱۱-۴ محاسبه می‌شود.

$$T_{W,O} = T_{W,i} - \frac{\dot{q}D_i}{2k} \left[\ln \frac{D_o}{D_i} \right] \quad (۱۱-۴)$$

K ضریب هدایت حرارتی لوله و $T_{W,i}$ دمای سطح داخلی لوله فولادی می‌باشد.

عدد ناسلت محلی در فاصله محوری Z از لوله به صورت زیر تعریف می‌شود. در این رابطه k ضریب

هدایت حرارتی سیال می‌باشد.

$$Nu(z) = \frac{h_z D_H}{k} \quad (۱۲-۴)$$

x_{fd} طول توسعه یافتگی گرمایی برای جریان آرام و داخل لوله از رابطه ۱۳-۴ به دست می‌آید. D_H

قطر هیدرولیکی می‌باشد [۴].

$$\frac{x_{fd}}{D_H} = 0.05 Re Pr \quad (۱۳-۴)$$

طول ناحیه‌ای از جریان که جوشش مادون سرد در آن رخ می‌دهد به عنوان طول مادون سرد تعریف

شده و از رابطه ۱۴-۴ محاسبه می‌شود [۱].

$$Z_{sc} = \frac{GDC_p}{4q} (T_{sat} - T_b) \quad (14-4)$$

طول مادون سرد برای هر شارحرارتی و دبی حجمی محاسبه شده و در جدول ۳-۴ آورده شده است.

جدول ۳-۴: طول مادون سرد برای شرایط مختلف آزمایش

Q (ml/min) دبی حجمی	q (kW/m ²) شارحرارتی	Z _{sc} (cm) طول مادون سرد
۷۰۰	۱۵	۲۵
	۲۰	۱۵
۱۲۰۰	۱۵	۴۷
	۲۰	۳۳
	۲۴	۲۷
	۳۰	۱۹
۱۷۰۰	۲۰	۵۸
	۲۴	۴۶
	۳۰	۳۲

در همه این روابط خواص فیزیکی سیال در دمای توده سیال ($\frac{T_{in}+T_{out}}{2}$) محاسبه می‌شود. برای

محاسبه خواص سیال از روابط شرغای [۶۳] که برای آب مقطر ارائه داده است، استفاده می‌کنیم. این

روابط به صورت زیر است [۶۳]:

$$T^* = \frac{T + 273.15}{300} \quad (15-4)$$

$$\mu = (-1.12729 \times 10^{-9} T^3) + (3.0075 \times 10^{-7} T^2) - (3.09368 \times 10^{-5} T) + (1.4825 \times 10^{-3}) \quad (16-4)$$

$$C_p = (1.136 \times 10^{-9}T^4) - (2.89748 \times 10^{-7}T^3) + (3.498 \times 10^{-5}T^2) - (1.6133 \times 10^{-3}T) + 4.203 \quad (۱۷-۴)$$

$$K = (-0.797015 \times T^{*-0.194}) - (0.25124 \times T^{*-4.717}) + (0.09643 \times T^{*-6.385}) - (0.032696 \times T^{-2.134}) \quad (۱۸-۴)$$

۴-۵-اعتبار سنجی نتایج

به منظور صحت سنجی آزمایش‌ها، نتایج تجربی برای جوشش جریانی مادون سرد در شارهای حرارتی و دبی جرمی مختلف در فضای بین دو لوله هم‌مرکز با رابطه شاه مقایسه شده است. رابطه ۴-۱۹ رابطه شاه [۶۲] برای انتقال حرارت جوشش مادون سرد به صورت زیر است [۶۲]:

$$\ddot{q} = h_l(T_w - T_b) + h_l(\varphi_0 - 1)(T_w - T_{sat}) \quad (۱۹-۴)$$

عبارت $h_l(T_w - T_b)$ در رابطه ۴-۱۹ مربوط به انتقال حرارت جابه‌جایی و عبارت $h_l(\varphi_0 - 1)(T_w - T_{SAT})$ مربوط به انتقال حرارت جوشش هسته‌ای می‌باشد. h_l ضریب انتقال حرارت حالت تک‌فاز می‌باشد که از معادله سایدِر و تیت [۳۷] محاسبه می‌شود. پارامتر φ_0 نیز با توجه به مقدار عدد جوشش به صورت زیر تعریف می‌شود [۶۲]:

$$\varphi_0 = 230BO^{0.5} \quad BO > 0.3 \times 10^{-4} \quad (۲۰-۴)$$

$$\varphi_0 = 1 + 46BO^{0.5} \quad BO < 0.3 \times 10^{-4} \quad (۲۱-۴)$$

در این معادلات BO معرف عدد جوشش^۱ می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$BO = \frac{q}{Gh_{fg}} \quad (۲۲-۴)$$

q شارحرارتی گرفته شده سیال، G شار جرمی و h_{fg} آنتالپی تبخیر می‌باشد.

¹ Boiling number

$$G = \rho u \quad (23-4)$$

ضریب انتقال حرارت تکفاز در معادله شاه (h_l) در جریان آرام از رابطه ۴-۲۴ معروف به رابطه سایدیر و تیت محاسبه می‌شود. رابطه سایدیر و تیت برای جریان آرام و تکفاز به شرح زیر است [۳۷]:

$$NU_l = 1.87 \left(Re \, Pr \, \frac{D}{L} \right)^{0.33} (\mu_b / \mu_w)^{0.14} \quad (24-4)$$

μ_w و μ_b به ترتیب لزجت سیال در دمای بالک و لزجت سیال در دمای دیواره می‌باشد.

عدد بدون بعد رینولدز (Re) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (25-4)$$

که ρ ، μ و u به ترتیب بیانگر چگالی، لزجت دینامیکی سیال و سرعت سیال و همچنین θ لزجت سینماتیکی و α نیز ضریب نفوذ گرمایی می‌باشد.

نتایج حاصل از داده‌های آزمایش با رابطه شاه [۶۲] برای ضریب انتقال حرارت جوشش مادون سرد مقایسه شد و رابطه شاه توانست با درصد خطای خوبی نتایج آزمایش را پیش‌بینی کند. ابتدا با استفاده از رابطه سایدیر و تیت [۳۷] ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی حالت تک فاز محاسبه شد. سپس با محاسبه عدد جوشش، پارامتر ϕ_0 محاسبه می‌شود. در نهایت با داشتن این مقادیر و همچنین دمای سطح و سیال در هر مرحله از آزمایش نرخ انتقال حرارت توسط رابطه ۴-۱۹ رابطه شاه [۶۲] محاسبه می‌شود. حال مقدار نرخ انتقال حرارت گرفته شده توسط سیال را در هر مرحله از آزمایش با استفاده از رابطه ۴-۷ محاسبه نموده و با مقدار بدست آمده از رابطه شاه مقایسه می‌کنیم. میانگین خطای محاسبه نرخ انتقال حرارت از آزمایش در مقایسه با نرخ انتقال حرارت از رابطه شاه [۶۲] (رابطه ۴-۱۸) ۲۱٪ بود که درصد خطای معقولی می‌باشد و نشان از درستی نتایج آزمایش دارد. نتایج محاسبه نرخ انتقال حرارت برای ۳ دبی حجمی ۷۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۷۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، با مقدار تئوری آن از رابطه شاه مقایسه شد که این مقایسه به همراه درصد خطای آن در جدول ۴-۴ آورده

شده است. همچنین درصد خطای انتقال حرارت تک فاز آزمایش با استفاده از معادله سایدرو و تیت

[۵۷] برای دبی ۱۲۰۰ و ۱۷۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه به ترتیب برابر با ۳۲ و ۱۶ درصد به دست آمد.

جدول ۴-۴: مقایسه نتایج حاصل از آزمایش با رابطه شاه [۶۲]

درصد خطا (%) [۶۲]	q (kw/m ²) تئوری از رابطه ۴-۱۸ [۶۲]	q (kw/m ²) شارحرارتی آزمایش	Q (ml/min) دبی حجمی
۱۴٪	۱۷	۱۵	۷۰۰
۲۵٪	۲۴	۲۰	
۱۲٪	۱۸	۱۵	۱۲۰۰
۱۹٪	۲۴	۲۰	
۲۷٪	۲۹	۲۴	
۲۳٪	۳۵	۳۰	
۱۱٪	۱۷	۱۵	۱۷۰۰
۲۸٪	۲۶	۲۰	
۲۵٪	۳۰	۲۴	
۱۷٪	۳۵	۳۰	

همچنین به منظور صحت‌سنجی مقادیر محاسبه شده برای ضریب انتقال حرارت جوشش، از معادله

۲۶-۴ بوریشانسکی^۱ استفاده شده است. ضریب انتقال حرارت از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱]:

$$h = A^* \dot{q}^{0.7} F(P) \quad (26-4)$$

$F(P)$ تابعی از فشار نسبی P_r و A^* ثابتی است که در فشار نسبی مرجع $P_r^* = 0.0294$ محاسبه می‌شود.

موستینسکی^۲ عبارات زیر را برای A^* و $F(P)$ پیشنهاد کرد [۱].

$$A^* = 0.1011 P_{cr}^{0.69} \quad (27-4)$$

$$F(P) = 1.8 P_r^{3.17} + 4 P_r^{1.2} + 10 P_r^{10} \quad (28-4)$$

نتایج حاصل برای ضریب انتقال حرارت جوشش با رابطه ۲۶-۴ مقایسه شد و رابطه بوریشانسکی محدوده ضریب انتقال حرارت جوشش آزمایش‌ها را پیش‌بینی می‌کند.

۴-۶- نتایج حاصل از آزمایش

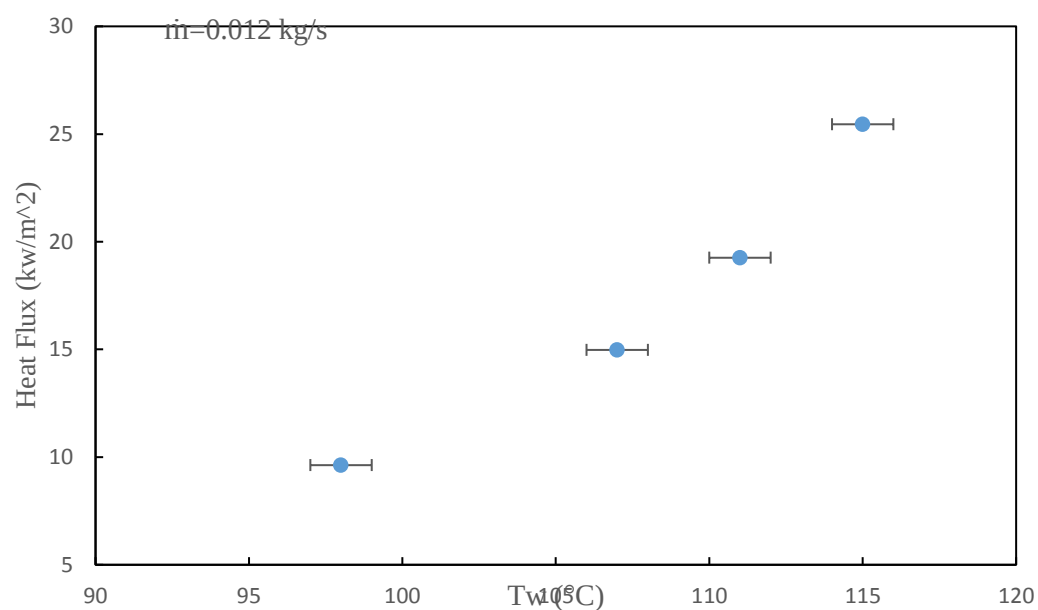
۴-۶-۱- جریان جوشش مادون‌سرد در بین دو لوله هم‌محور عمودی

در شکل‌های ۱-۴، ۲-۴ و ۳-۴ به ترتیب منحنی‌های جوشش، شارحرارتی در برابر دمای دیواره گرم شده، برای دبی‌های جرمی 0.012 kg/s ، 0.02 kg/s ، 0.0286 kg/s در مکان محوری ثابت $z=45 \text{ cm}$ از ابتدای ورودی بخش آزمون در دمای مادون‌سرد ورودی 50°C را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود با افزایش شارحرارتی دمای دیواره افزایش می‌یابد. در آغاز با افزایش شارحرارتی تحت شرایط سیال مادون‌سرد، انتقال حرارت جابجایی اجباری تک فاز

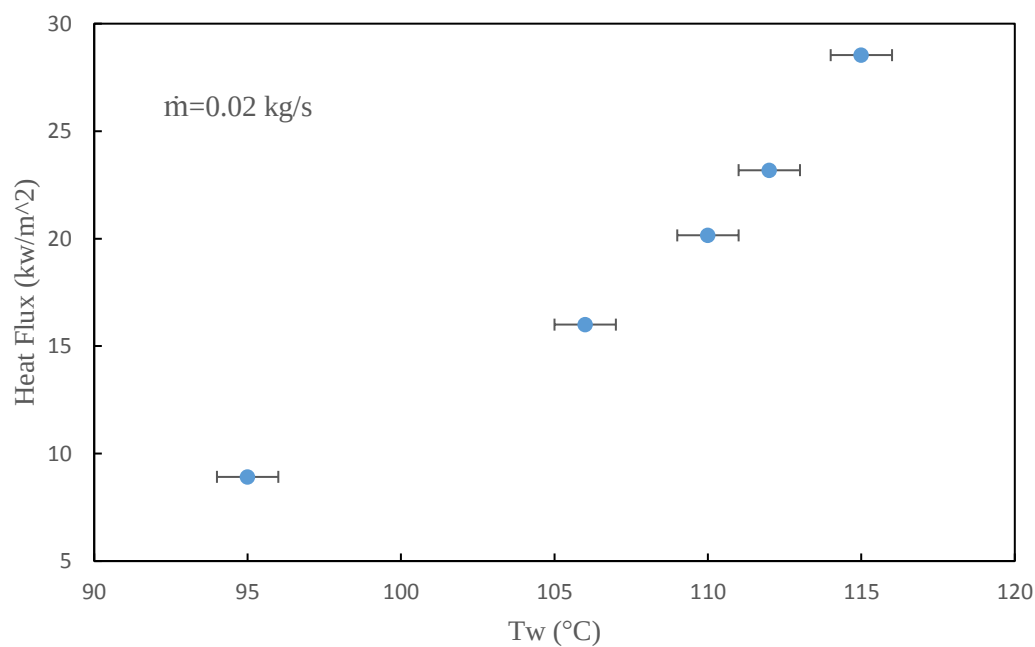
¹Borishanski

²Mostinski

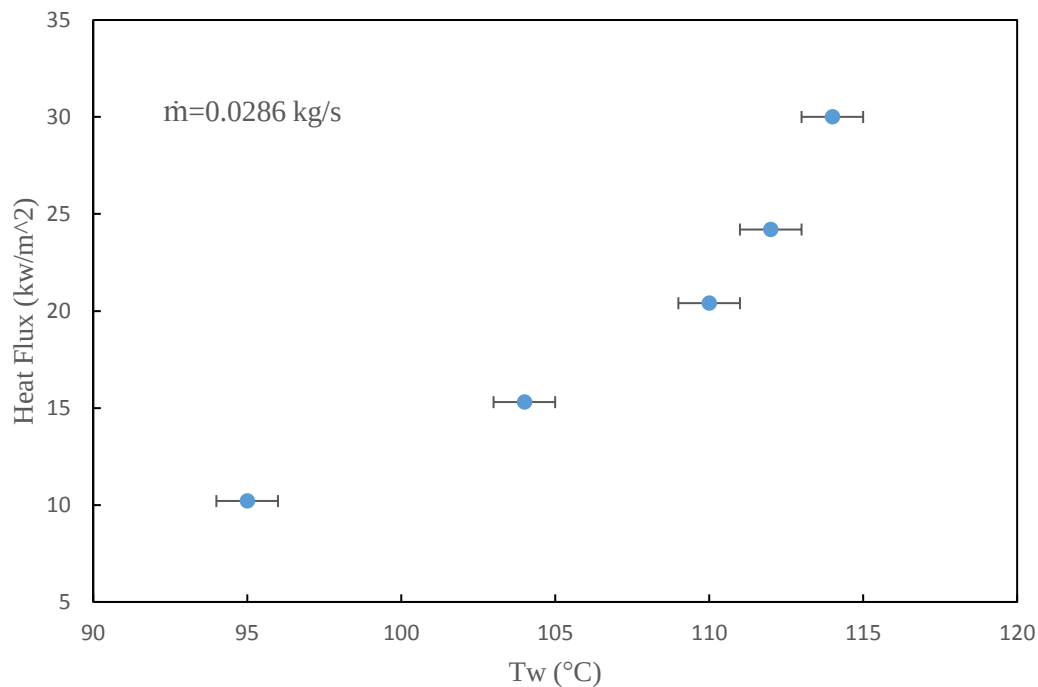
اتفاق می‌افتد و دمای سطح با شیب نسبتاً زیاد تغییر می‌کند، سپس سیال نزدیک به دیواره لوله داخلی، فوق گرم می‌شود در حالی که جریان در هسته لوله مادون سرد می‌باشد. افزایش بیشتر شارحرارتی باعث افزایش فوق گرم دیواره می‌شود، ΔT_{sat} و باعث فعالسازی هسته‌های بخار می‌شود. هنگامی که شارحرارتی بالاتر از نقطه شروع جوشش هسته‌ای می‌رود، بیشتر مکان‌های بخار فعال می‌شوند و افزایش کوچکی در دمای دیواره دیده می‌شود و شیب تغییر دما کم شده و نمودار شکل منحنی به‌خود می‌گیرد. لازم به ذکر هست در طی آزمایش‌ها وقوع دقیق ONB با توجه به تشکیل حباب‌های بسیار ریز در این نقطه با چشم غیر مسلح قابل تشخیص نیست.



شکل ۴-۱: منحنی جوشش برای دمای مادون سرد ورودی 5°C
در بین دو لوله هم مرکز عمودی برای دبی جرمی 0.012 kg/s در مکان محوری ثابت $z=45 \text{ cm}$

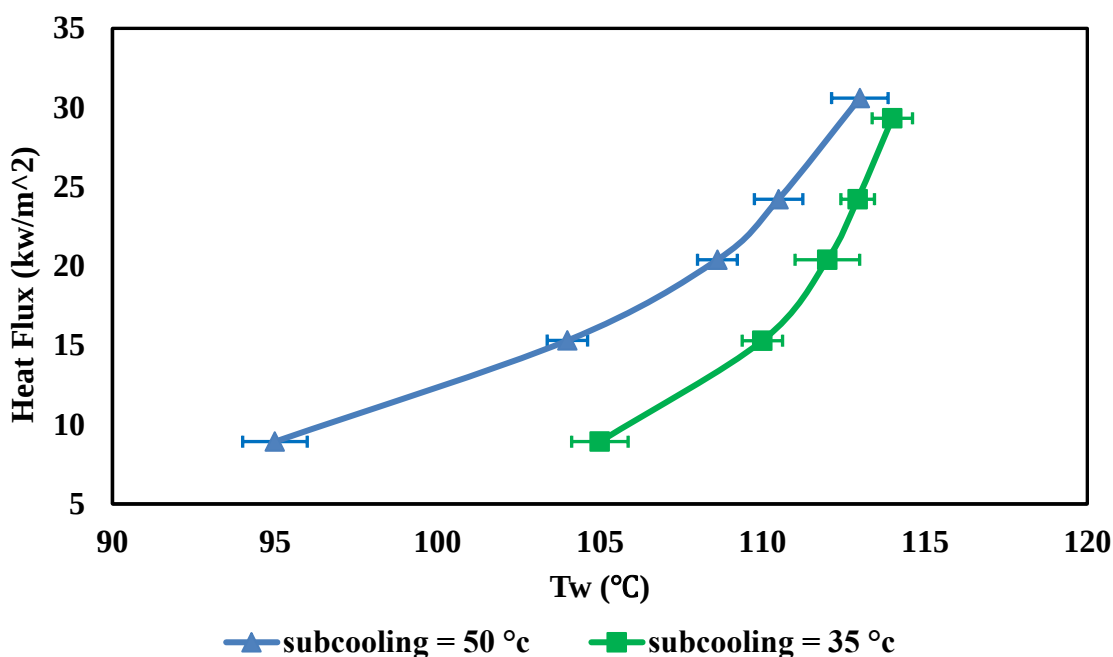


شکل ۴-۲: منحنی جوشش برای دمای مادون سرد ورودی 5°C
در بین دو لوله هم مرکز عمودی برای دبی جرمی 0.02 kg/s در مکان محوری ثابت $z=45 \text{ cm}$



شکل ۴-۳: منحنی جوشش برای دمای مادون سرد ورودی ۵۰°C

در بین دو لوله هم مرکز عمودی برای دبی جرمی ۰/۰۲۸۶ kg/s در مکان محوری ثابت $z=45\text{cm}$ در شکل ۴-۴ به بررسی تأثیر افزایش دمای مادون سرد ورودی ۳۵ °C به ۵۰ °C، بر دمای سطح در شارهای حرارتی مختلف اشاره شده است. در این شکل نمودار دمای سطح برای دبی جرمی kg/s ۰/۰۲۸۶ در مکان محوری ثابت $z=45\text{cm}$ رسم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است افزایش دمای مادون سرد ورودی از ۳۵°C به ۵۰°C باعث می‌شود دمای سطح بین ۱ تا ۶ درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا کند. در واقع با افزایش دمای ورودی سیال به بخش آزمون، دمای سطح افزایش می‌یابد.



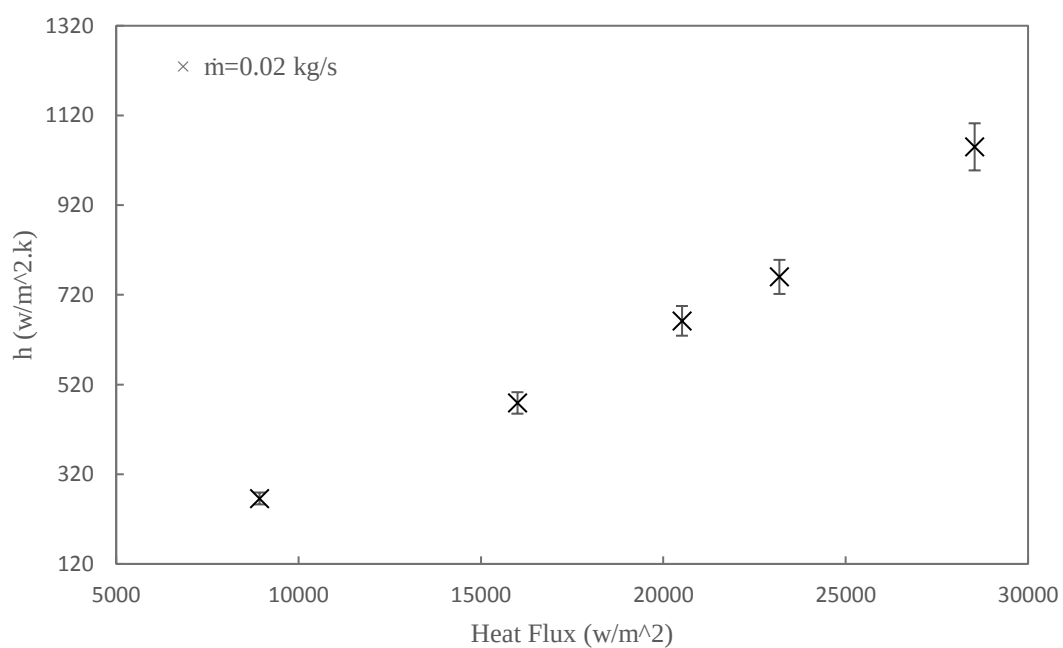
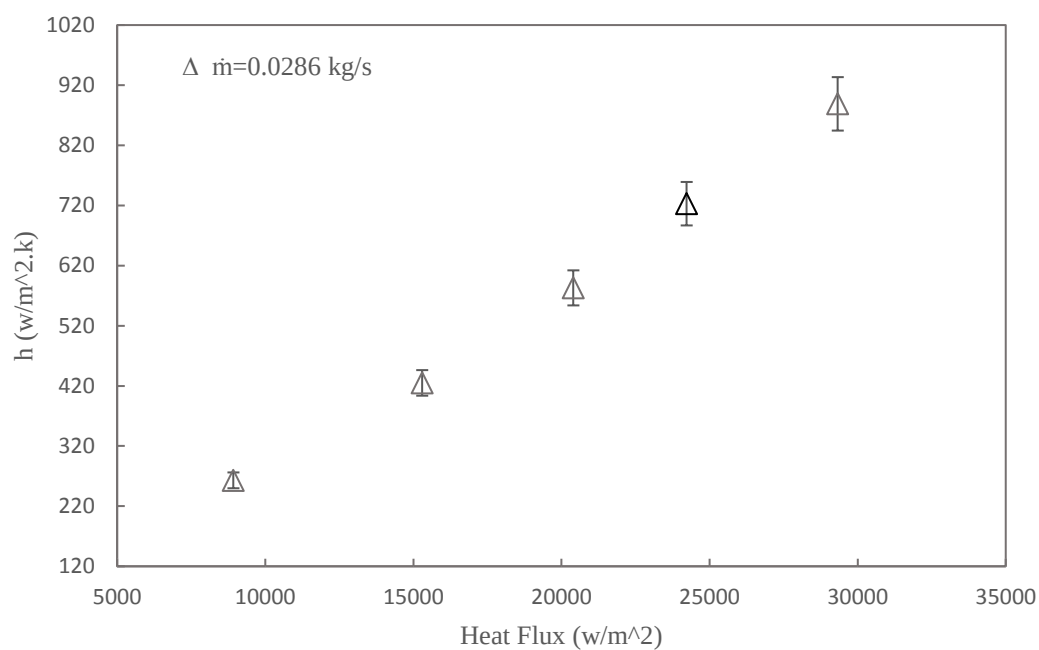
شکل ۴-۴: بررسی تأثیر دمای مادون سرد ورودی بر روی دمای سطح برای دبی جرمی ۰/۰۲۸۶ kg/s در مکان محوری ثابت $z=۴۵\text{cm}$

۴-۶-۱-۱-ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد در بین دو لوله هم‌محور عمودی

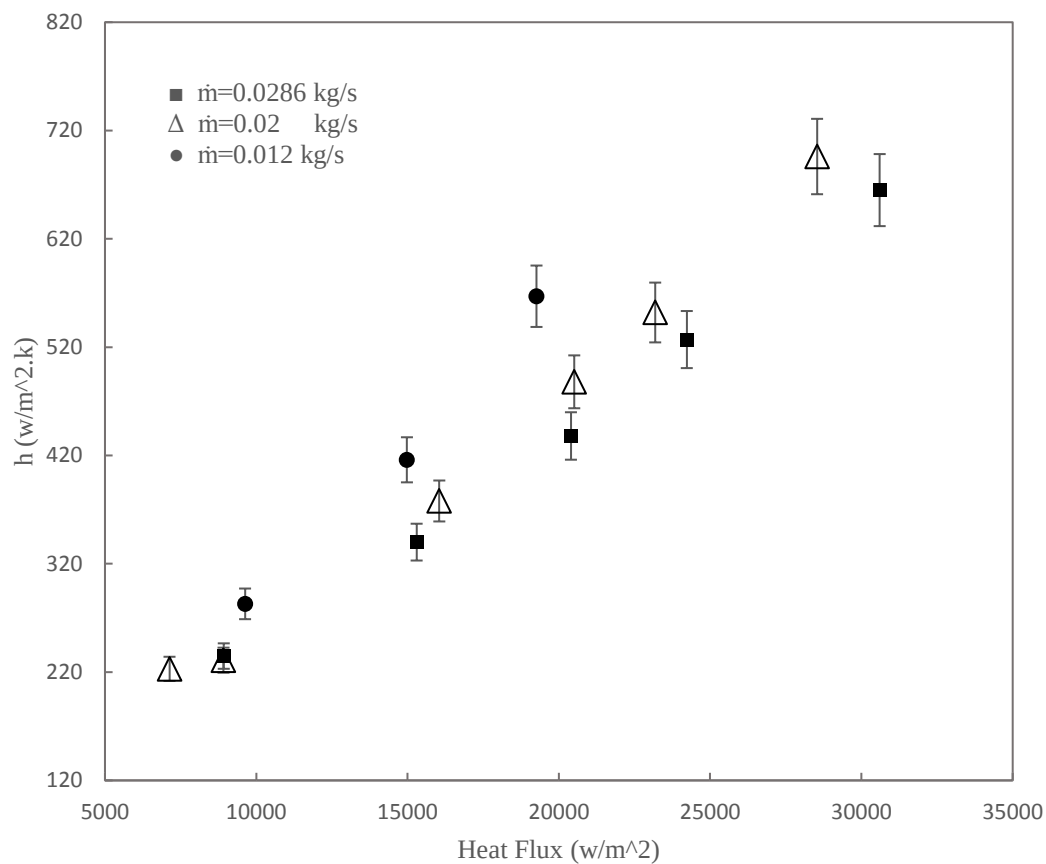
در این قسمت به بررسی ضریب انتقال حرارت جوشش مادون سرد در بین دو لوله هم‌محور عمودی پرداخته می‌شود و اثر پارامترهایی مانند شارحرارتی، دبی جرمی، دمای مادون سرد ورودی بر ضریب انتقال حرارت بررسی می‌شود. با توجه به اینکه ضریب انتقال حرارت جوشش در محدوده اعداد بیشتر از 10^3 می‌باشد ولی در این مطالعه آزمایشگاهی به دلیل پایین بودن عدد رینولدز جریان، محدوده ضریب انتقال حرارت کمتر از 10^3 است. این محدوده از ضریب انتقال حرارت با مطالعه تجربی زنگنه و همکاران [۶۴] مقایسه شد که مطابقت خوبی با کار آن‌ها دارد و صحت این محدوده از ضریب انتقال حرارت جوشش را تایید می‌کند.

۴-۶-۱-۲- تأثیر دبی جرمی بر ضریب انتقال حرارت

شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶ وابستگی ضریب انتقال حرارت به دبی جرمی در بین دو لوله هم‌محور عمودی در مکان محوری ثابت $z=45\text{cm}$ در دمای مادون‌سرد ورودی 50°C و 35°C را نشان می‌دهند. با کاهش دبی جرمی در محدوده 0.012 kg/s - 0.0286 kg/s در ناحیه جوشش مادون‌سرد در یک شارحرارتی ثابت، ضریب انتقال حرارت تا ۳۰٪ افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶ دیده می‌شود، ضریب انتقال حرارت تابعی از دبی جرمی برای یک مقدار معین شارحرارتی است. در ناحیه انتقال حرارت جوشش مادون‌سرد توسعه یافته، اساساً دمای دیواره مستقل از دبی جرمی می‌باشد [۹۳-۹۴]، دمای دیواره تقریباً ثابت می‌ماند و افزایش کمی در دمای دیواره اتفاق می‌افتد. بنابراین، چنانچه دبی جرمی در این ناحیه کاهش یابد، دمای بالک سیال افزایش می‌یابد در حالی که دمای دیواره تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین طبق تعریف معادله سرمایش نیوتن، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد [۹۵-۹۶].



شکل ۴-۵: تغییرات ضریب انتقال حرارت برای دبی‌های جرمی 0.012 kg/s ، 0.02 kg/s ، 0.0286 kg/s تحت شارهای حرارتی مختلف در بین دو لوله هم‌محور عمودی در مکان محوری ثابت $z=45 \text{ cm}$ برای مادن سرد ورودی 35°C

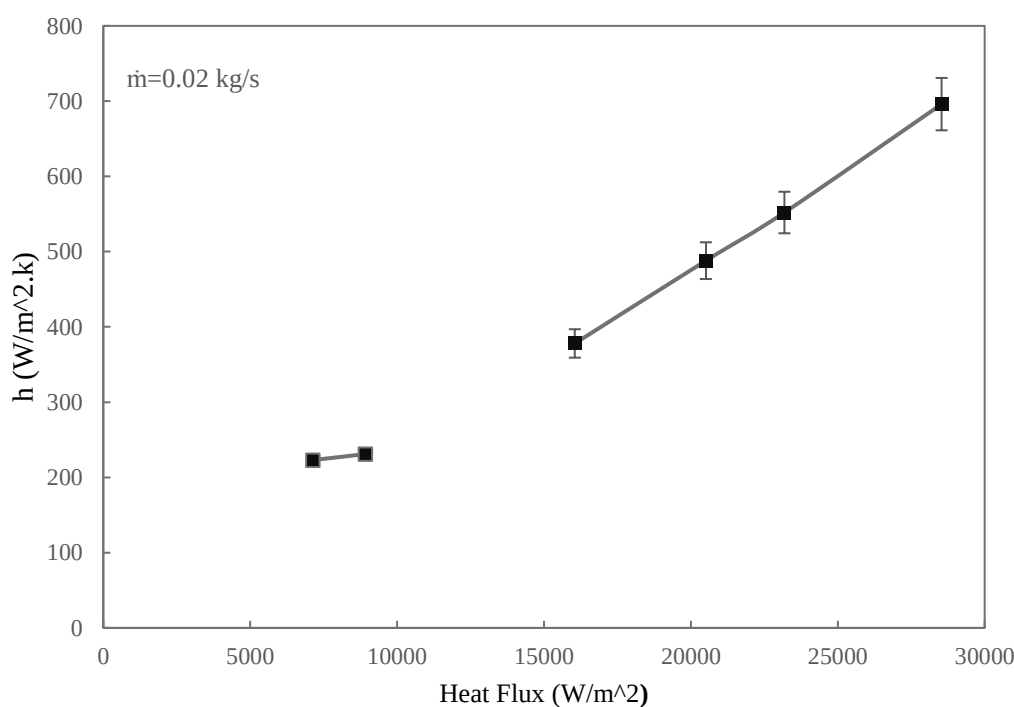


شکل ۴-۶: تغییرات ضریب انتقال حرارت برای دبی‌های جرمی 0.012 kg/s، 0.02 kg/s، 0.0286 kg/s تحت شارهای حرارتی مختلف در بین دو لوله هم‌محور عمودی در مکان محوری ثابت $z=45$ cm برای مادون سرد ورودی 50°C

۴-۶-۱-۳- روند تغییرات ضریب انتقال حرارت در شارهای حرارتی مختلف

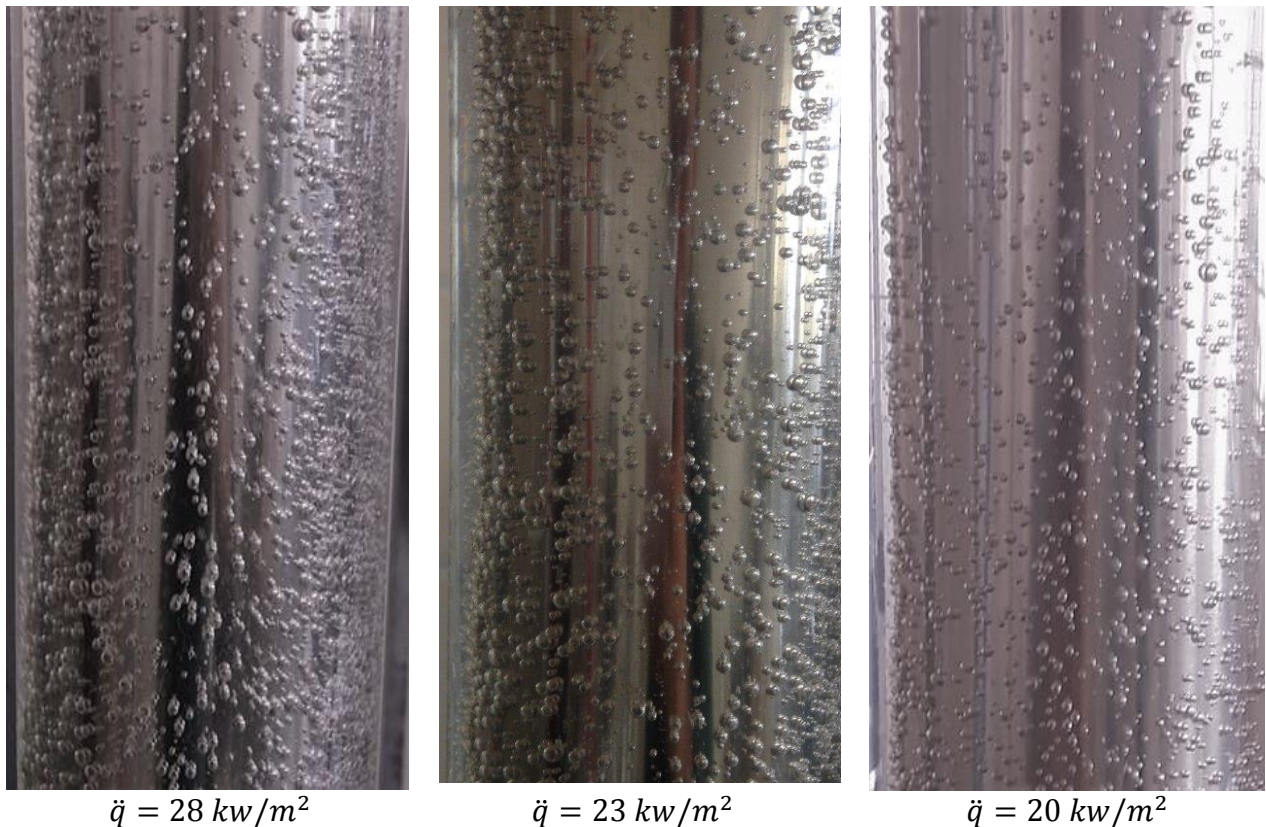
در این قسمت تغییرات ضریب انتقال حرارت جریان برای دبی جرمی 0.02 kg/s در مکان محوری ثابت $z=45$ cm را تحت شارهای حرارتی مختلف در دمای مادون سرد ورودی 50°C را بررسی می‌کنیم.

همان‌طور که در شکل ۴-۷ دیده می‌شود، ضریب انتقال حرارت به شدت تابعی از شارحرارتی می‌باشد. همچنین باید توجه کرد که در شارهای حرارتی پایین‌تر، انتقال حرارت جابجایی اجباری تک‌فاز مشاهده می‌شود و بعد از مقداری افزایش در شارحرارتی، حباب‌های بسیار کوچک روی سطح انتقال حرارت تولید و به دلیل پایین بودن دمای اطراف بطور ناگهانی محو می‌شوند. یک نقطه در مکانیسم انتقال حرارت وجود دارد که از جابجایی اجباری به جوشش جریانی تغییر می‌کند. تعیین دقیق این نقطه با مشاهدات معمولی آسان نیست. به هر حال تولید حبابها باعث افزایش انتقال حرارت از سطح گرم شده می‌شود، همان‌طور که در شکل ۴-۷ دیده می‌شود شیب منحنی ضریب انتقال حرارت در نقطه‌ای که مکانیسم انتقال حرارت تغییر می‌کند، به شدت افزایش می‌یابد. اثر شارحرارتی روی ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری کوچک است در حالی که در ناحیه جوشش دارای اثری غیرقابل صرف‌نظر می‌باشد.



شکل ۴-۷: تغییرات ضریب انتقال حرارت جریان برای دبی جرمی ۰/۰۲ kg/s در مکان محوری ثابت $z=45\text{cm}$ را تحت شارهای حرارتی مختلف برای مادون سرد ورودی 50°C

شکل ۴-۸ اثر افزایش شارحرارتی بر میزان تولید حباب روی سطح در جوشش مادون سرد در دبی جرمی 0.02 kg/s و شارهای حرارتی $20 \text{ (kw/m}^2\text{)}$ ، $23 \text{ (kw/m}^2\text{)}$ و $28 \text{ (kw/m}^2\text{)}$ نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۴-۸ دیده می‌شود با افزایش شارحرارتی تعداد و اندازه حباب‌ها افزایش می‌یابد.

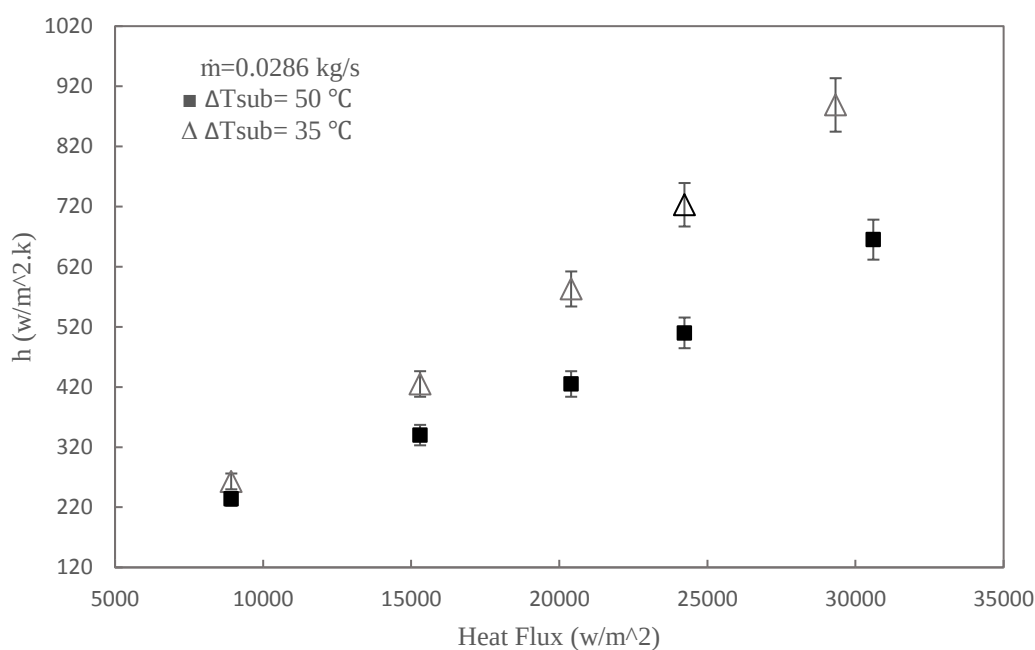


شکل ۴-۸: اثر افزایش شارحرارتی بر رفتار حباب روی سطح در جوشش مادون سرد در دبی جرمی 0.02 kg/s و دمای مادون سرد ورودی 50°C

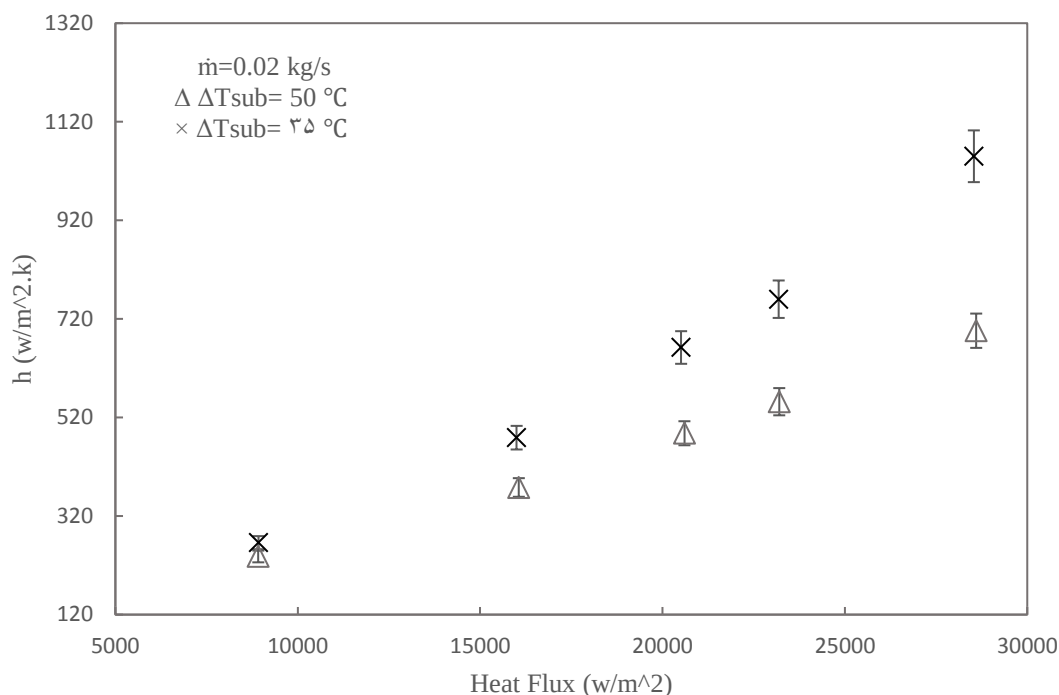
۴-۱-۶-۴- تأثیر دمای مادون سرد ورودی بر ضریب انتقال حرارت

شکل ۴-۹ اثر تغییر دمای مادون سرد ورودی بر ضریب انتقال حرارت در دبی‌های جرمی 0.0286 kg/s و 0.02 kg/s در بین دو لوله هم‌محور عمودی در مکان محوری ثابت $z=45\text{cm}$ را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، کاهش مادون سرد ورودی منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت مادون سرد می‌شود. بخصوص، در شارهای حرارتی بالا، تغییرات ضریب انتقال حرارت مادون سرد

مشهود است. نتیجه شد که در یک دبی و شارحرارتی ثابت، با کاهش دمای مادون سرد از 50°C به 35°C ، ضریب انتقال حرارت به میزان ۳۵٪ افزایش یافت. در مادون سرد ورودی کوچکتر، با افزایش تراکم سایت‌های هسته‌ای و تولید حباب‌های بیشتر، شدت تلاطم مایع بیشتر شده و مایع راحت‌تر به سطح گرمایش می‌رسد که منجر به مقادیر بالاتر ضریب انتقال حرارت مادون سرد می‌شود [۸۶]. از آنجایی که در دمای مادون سرد ورودی بالاتر مکانیزم انتقال حرارت تک‌فاز مهم‌تر از مکانیزم جوش هسته‌ای است، شدت تحریک مایع به دلیل ایجاد و جدایش حباب‌ها تأثیر کمتری در تغییر نرخ انتقال حرارت دارد. علاوه بر این اندازه حباب‌های ایجاد شده روی سطح و تراکم مکان‌های هسته‌زایی کوچک‌تر هستند. در دماهای مادون سرد پایین، دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت افزایش تراکم مکان‌های هسته‌زایی و تولید حباب‌های بیشتر است که موجب تلاطم سیال می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۹-۴: اثر تغییر مادون سرد ورودی بر ضریب انتقال حرارت برای دبی‌های جرمی الف) ۰/۰۲۸۶ kg/s، ب) ۰/۰۲ kg/s تحت شارهای حرارتی مختلف در بین دو لوله هم‌محور عمودی در مکان محوری ثابت $z=45\text{cm}$

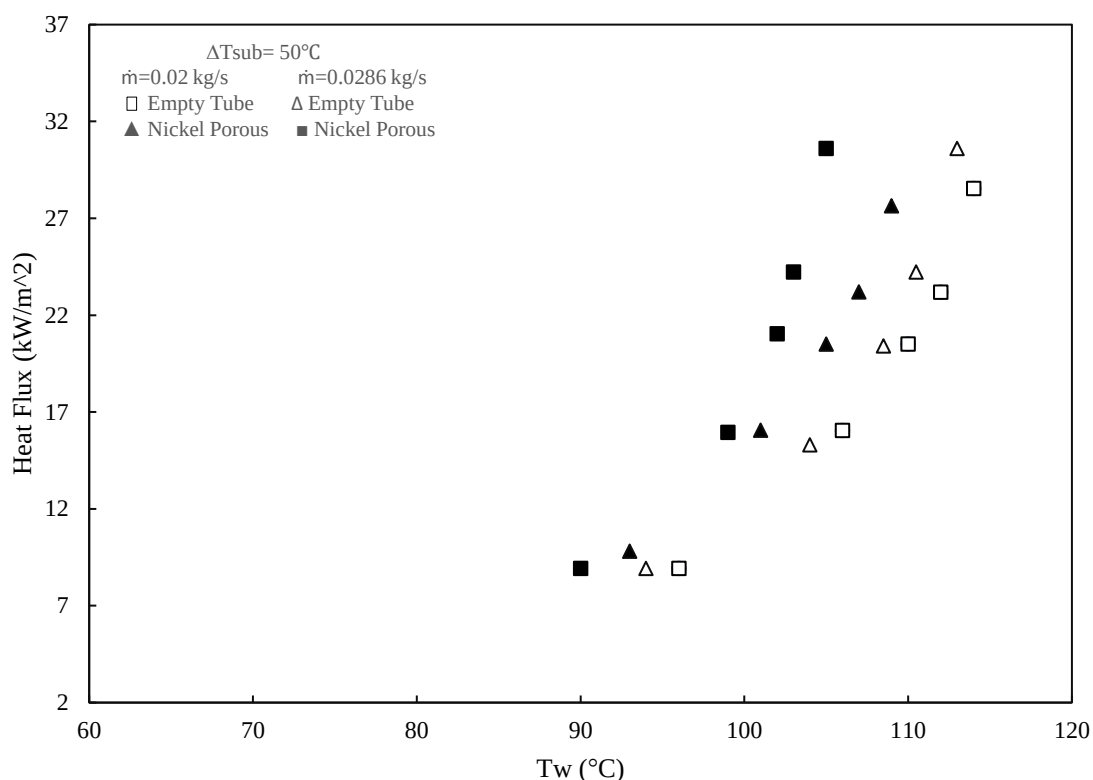
همچنین در شکل ۹-۴ واضح است که تأثیر دمای مادون سرد در ناحیه انتقال حرارت تک فاز کمتر از ناحیه جوشش مادون سرد می‌باشد. به عبارت دیگر در شارهای حرارتی پایین زمانی که انتقال حرارت تک فاز داریم با کاهش دمای مادون سرد ورودی ضریب انتقال حرارت تغییرات زیادی ندارد ولی در شارهای حرارتی بالا و بعد از شروع جوشش مادون سرد ضریب انتقال حرارت تغییر زیادی پیدا می‌کند و درصد افزایش آن نسبت به شارهای پایین‌تر بیشتر است.

در این مطالعه آزمایشگاهی پس از بررسی تأثیر پارامترها بر روی ضریب انتقال حرارت جوشش در بین دو لوله هم‌محور عمودی در ابعاد ذکر شده، نتیجه شد که تغییر دمای مادون سرد ورودی نسبت به دیگر پارامترها از جمله شارحرارتی و دبی حجمی، تأثیر خیلی بیشتری بر روی ضریب انتقال حرارت

دارد و به نسبت بیشتری از دیگر پارامترها ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. کاهش دمای مادون سرد ورودی از ۵۰ به ۳۵ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش ضریب انتقال حرارت به میزان ۳۵٪ (۱/۳۵ برابر) می‌شود که در بین پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش بیشترین نقش را در بهبودی ضریب انتقال حرارت ایفا می‌کند.

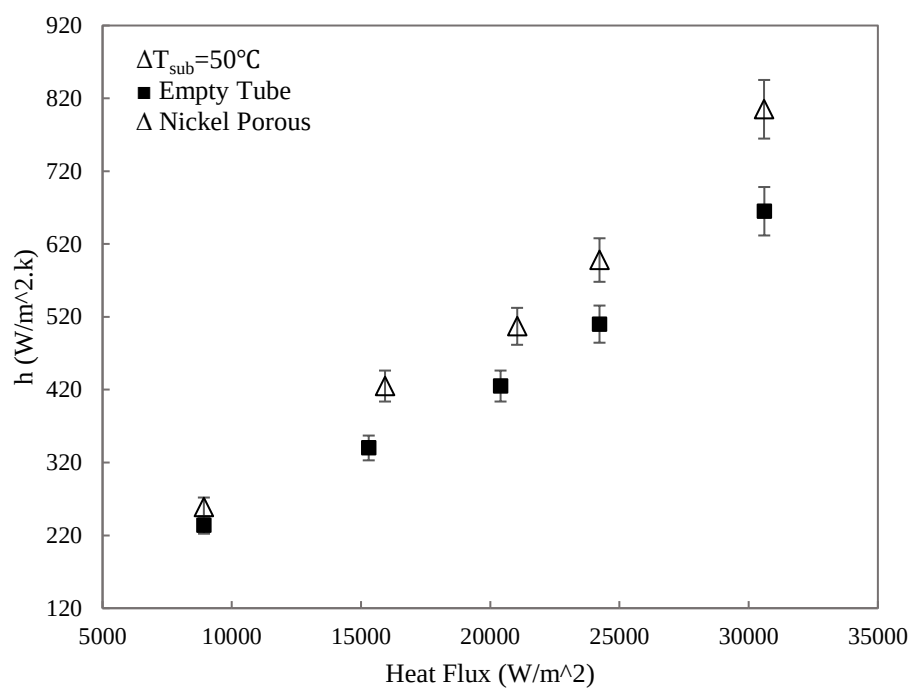
۴-۶-۲- تاثیر ماده متخلخل بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد در بین دو لوله هم مرکز عمودی

شکل ۴-۱۰ تاثیر استفاده از فوم فلزی نیکل بر منحنی‌های جوشش برای دبی‌های جرمی kg/s 0.0286 - 0.02 در مکان محوری ثابت $z=45\text{cm}$ در دمای مادون سرد ورودی 50°C را نشان می‌دهند. همانطور که دیده می‌شود که استفاده از فوم فلزی متخلخل عملکرد جوشش سطح صاف را به میزان قابل توجهی افزایش داده است.

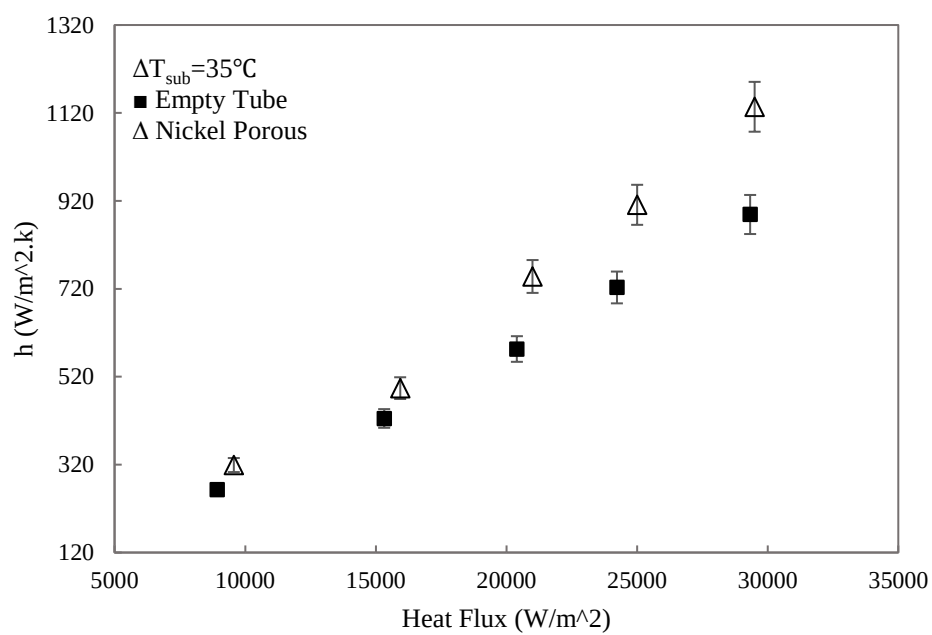


شکل ۴-۱۰: تاثیر استفاده از فوم فلزی نیکل بر منحنی‌های جوشش برای دمای مادون سرد ورودی 50°C در بین دو لوله هم مرکز عمودی برای دبی‌های جرمی 0.02 kg/s، 0.0286 kg/s در مکان محوری ثابت $z=45\text{cm}$

شکل ۴-۱۱ اثر استفاده از فوم فلزی بر ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد در دبی جرمی 0.0286 kg/s برای دمای مادون سرد ورودی 50°C نشان می‌دهد. با قرار دادن فوم فلزی در در بین دو لوله هم مرکز عمودی تعداد مکان‌های فعال تشکیل بخار افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش سطح در معرض سیال می‌باشد. دهانه‌های کوچک بین حفره‌ها به سیال اجازه می‌دهد که همه حفره‌ها را پر کند که به نوبه خود منجر به افزایش تعداد مکان‌های فعال تشکیل بخار می‌شود. استفاده از فوم فلزی بطور قابل توجهی عملکرد جوشش مادون سرد در لوله را بهبود می‌بخشد و ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد را حدود ۳۰ درصد افزایش می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۱: تاثیر استفاده از فوم فلزی نیکل بر ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد برای دمای مادون سرد ورودی الف) 50°C ، ب) 35°C در بین دو لوله هم مرکز عمودی برای دبی 0.0286 kg/s در مکان محوری ثابت $z=45\text{cm}$

شکل ۴-۱۲ اثر استفاده از فوم فلزی نیکل بر رفتار تولید حباب روی سطح در جوشش مادون سرد در دبی جرمی 0.02 kg/s نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۴-۱۱ دیده می‌شود استفاده از فوم فلزی منجر به افزایش تعداد مکان‌های فعال تشکیل بخار می‌شود که ناشی از افزایش سطح در معرض سیال می‌باشد.



$$\dot{q} = 28 \text{ kw/m}^2$$

$$\dot{q} = 20 \text{ kw/m}^2$$

شکل ۴-۱۲: اثر استفاده از فوم فلزی بر رفتار حباب روی سطح در جوشش مادون سرد در دبی جرمی 0.0286 kg/s و دمای مادون سرد ورودی 50°C

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و

پیشنهادات

۵-۱- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تجربی تاثیر ماده متخلخل بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد در بین دو لوله هم مرکز عمودی با فضای حلقوی در ابعاد ماکرو در فشار اتمسفریک و سیال کاری آب پرداخته شده و اثر پارامترهایی مانند شار حرارت، دبی جرمی و دمای مادون سرد ورودی بر ضریب انتقال حرارت بررسی شده است.

نتایج این پژوهش محدوده دبی جرمی 0.012 kg/s تا 0.0286 kg/s و شارحرارتی 5 kw/m^2 تا 30 kw/m^2 برای دو دمای مادون سرد ورودی 35°C و 50°C را شامل می شود. ضرایب انتقال حرارت حاصل آزمایش با رابطه ارائه شده توسط شاه [۶۲] برای دو لوله هم مرکز مورد مقایسه قرار گرفت و نتیجه شد که رابطه شاه با میانگین اختلاف 23% به خوبی می تواند ضریب انتقال حرارت جوشش جریان برای دو لوله هم مرکز مورد آزمایش را پیش بینی کند. بررسی نتایج در طول آزمایش نشان می دهد که انتقال حرارت از دو مکانیسم جابجایی اجباری و جوشش جریانی تشکیل می یابد. نتایج حاصل از دمای سطح نشان داد که در شارهای حرارتی پایین و ناحیه تک فاز دما به صورت خطی و با یک شیب نسبتاً زیاد افزایش می یابد و زمانی که وارد ناحیه جوشش مادون سرد می شود با شیب کمتری شروع به افزایش می کند و در ادامه با افزایش شارحرارتی دمای سطح تقریباً ثابت می ماند. با بررسی تأثیر دبی جرمی بر ضریب انتقال حرارت در ناحیه انتقال حرارت جوشش مادون سرد، مشخص شد که ضریب انتقال حرارت تابعی از دبی جرمی برای یک مقدار معین شارحرارتی است و در یک شارحرارتی ثابت با کاهش دبی جرمی، دمای دیواره تقریباً ثابت می ماند و باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش مادون سرد تا 30% می شود.

همچنین اثر تغییر شارحرارتی بر ضریب انتقال حرارت نشان داد که ضریب انتقال حرارت به شدت تابعی از شار حرارت می باشد و در یک دبی حجمی و دمای مادون سرد ورودی ثابت با زیاد شدن شارحرارتی، ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد به گونه ای که در محدوده شارحرارتی 5 kw/m^2 تا

30 kw/m^2 ، ضریب انتقال حرارت بین $223 \text{ W/m}^2\text{k}$ تا $713 \text{ W/m}^2\text{k}$ تغییر می‌کند. در شارهای حرارتی پایین‌تر، انتقال حرارت جابجایی اجباری تک فاز مشاهده می‌شود و بعد از مقداری افزایش در شارحرارتی، حباب‌های بسیار کوچک روی سطح انتقال حرارت تولید و به دلیل پایین بودن دمای سیال اطراف آن، به‌طور ناگهانی محو می‌شوند. در یک نقطه مکانیسم انتقال حرارت از جابجایی اجباری به جوشش جریانی تغییر می‌کند. تعیین دقیق این نقطه با مشاهدات معمولی آسان نیست. به هر حال تولید حباب‌ها باعث افزایش انتقال حرارت از سطح گرم‌شده می‌شود.

در آزمایشی دیگر اثر تغییر دمای مادون سرد ورودی بررسی شد و نتیجه شد که اگر دمای مادون سرد ورودی را کاهش دهیم ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر بیشترین ضریب انتقال حرارت در مادون سردهای پایین اتفاق می‌افتد. با توجه به این بررسی مشخص شد که در یک دبی و شارحرارتی ثابت، با کاهش دمای مادون سرد از 50°C به 35°C ضریب انتقال حرارت تا 35% افزایش یافت. از آنجایی که در دمای مادون سرد بالاتر مکانیزم انتقال حرارت تک‌فاز مهم‌تر از مکانیزم جوشش هسته‌ای است، شدت تحریک مایع به دلیل ایجاد و جدایش حباب‌ها تأثیر کمتری در تغییر نرخ انتقال حرارت دارد. علاوه بر این اندازه حباب‌های ایجاد شده روی سطح و تراکم مکان‌های هسته‌زایی کوچک‌تر هستند. دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت در دمای مادون سرد پایین، افزایش تراکم مکان‌های هسته‌زایی و تولید حباب‌های بیشتر است که موجب تلاطم سیال می‌شود.

استفاده از فوم فلزی از جنس نیکل با 10 ppi و تخلخل 95% ، عملکرد جوشش سطح صاف را به میزان قابل توجهی افزایش داده است. با قرار دادن فوم فلزی در بین دو لوله هم مرکز عمودی تعداد مکان‌های فعال تشکیل بخار افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش سطح در معرض سیال می‌باشد. دهانه‌های کوچک بین حفره‌ها به سیال اجازه می‌دهد که همه حفره‌ها را پر کند که به نوبه خود منجر به افزایش تعداد مکان‌های فعال تشکیل بخار می‌شود. استفاده از فوم فلزی بطور قابل توجهی عملکرد جوشش مادون سرد در لوله را بهبود می‌بخشد و ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد در محدوده

ذکر شده را حدود ۳۰ درصد افزایش می‌دهد.

در نهایت در این مطالعه آزمایشگاهی پس از بررسی کلیه پارامترها بر روی ضریب انتقال حرارت، نتیجه شد که تغییر دمای مادون سرد ورودی نسبت به دیگر پارامترها از جمله شارحرارتی و دبی حجمی، تأثیر خیلی بیشتری بر روی ضریب انتقال حرارت دارد و با ۳۵٪ افزایش در بین پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش بیشترین نقش را در بهبودی ضریب انتقال حرارت ایفا می‌کند همچنین استفاده از محیط متخلخل، ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد را تا حدود ۳۰ درصد افزایش می‌دهد.

۵-۲-پیشنهادهای

می‌توان برای بهبود و ادامه این تحقیق موارد زیر را پیشنهاد کرد:

- ❖ بررسی تأثیر سیال عامل دیگری مانند نانوسیال
- ❖ تمرکز بر روی قطر جدایش و فرکانس جدایش حباب
- ❖ مطالعه تأثیر فشار
- ❖ مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی با شرایط مطالعه حاضر

مراجع

- [1] Collier, John G., and John R. Thome. *Convective boiling and condensation*. Clarendon Press, 1994.
- [2] Wang, Guodong, and Ping Cheng. "Subcooled flow boiling and microbubble emission boiling phenomena in a partially heated microchannel." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52.1-2 (2009): 79-91.
- [3] Lee, Jaeseon, and Issam Mudawar. "Critical heat flux for subcooled flow boiling in micro-channel heat sinks." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52.13-14 (2009): 3341-3352.
- [4] Incropera, DeWitt: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6 th Edition., Wiley, New York, pp. 620-667, 1995.
- [5] Tong, Long Sun, and P. D. Richardson. "Boiling heat transfer and two-phase flow." *Journal of Applied Mechanics* 33.2 (1966): 478.
- [6] Gungor, Kernal Ersin, and R. H. S. Winterton. "A general correlation for flow boiling in tubes and annuli." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 29.3 (1986): 351-358.
- [7] Gungor, K. E., and RH S. WINTERTON. "Simplified general correlation for saturated flow boiling and comparisons of correlations with data." *Chemical engineering research & design* 65.2 (1987): 148-156.
- [8] Kandlikar, Satish G. "A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes." (1990): 219-228.
- [9] Kandlikar, Satish G., and Prabhu Balasubramanian. "An extension of the flow boiling correlation to transition, laminar, and deep laminar flows in minichannels and microchannels." *Heat Transfer Engineering* 25.3 (2004): 86-93.
- [10] Kandlikar, Satish G., et al. "High speed photographic observation of flow boiling of water in parallel minichannels." *35th Proceedings of National Heat Transfer Conference*. 2001.
- [11] Kandlikar, Satish G., and Paul H. Spiesman. "Effect of surface finish on flow boiling heat transfer." *ASME Heat Transfer Div Publ HTD* 361 (1998): 157-163.
- [12] Zonouzi, S. Ahangar, et al. "Experimental study of subcooled boiling heat transfer of axial and swirling flows inside mini annular gaps." *Journal of Applied Fluid Mechanics* 11.1 (2018): 225-232.
- [13] Ahangar Zonouzi, Sajjad, et al. "Experimental and numerical study of swirling subcooled flow boiling of water in a vertical annulus." *Experimental Heat Transfer* 31.6 (2018): 513-530.
- [14] Chen, C. A., T. F. Lin, and Wei-Mon Yan. "Bubble characteristics in time periodic saturated flow boiling of R-134a in a narrow annular pipe due to heat flux oscillation." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 102 (2016): 1150-1158..
- [15] Shen, Zhi, et al. "Experimental investigation on heat transfer characteristics of smooth tube with downward flow." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 68 (2014): 669-676.
- [16] Mercado, Mariano, Nathaniel Wong, and Jason Hartwig. "Assessment of two-phase heat transfer coefficient and critical heat flux correlations for cryogenic flow boiling in pipe heating experiments." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 133 (2019): 295-315.

- [17] Peyghambarzadeh, S. M., et al. "Forced convective and subcooled flow boiling heat transfer to pure water and n-heptane in an annular heat exchanger." *Annals of Nuclear Energy* 53 (2013): 401-410.
- [18] Sarafraz, Mohammad Mohsen, and S. M. Peyghambarzadeh. "Experimental study on subcooled flow boiling heat transfer to water–diethylene glycol mixtures as a coolant inside a vertical annulus." *Experimental Thermal and Fluid Science* 50 (2013): 154-162.
- [19] Ahmed, Hamdi E., and Mirghani I. Ahmed. "Thermal performance of annulus with its applications; A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71 (2017): 170-190.
- [20] Hernández, Leonor, et al. "Flow regime identification in boiling two-phase flow in a vertical annulus." *Journal of fluids engineering* 133.9 (2011).
- [21] Li, Shaodan, et al. "An experimental study of bubble sliding characteristics in narrow channel." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 57.1 (2013): 89-99.
- [22] Yun, B. J., et al. "Characteristics of the local bubble parameters of a subcooled boiling flow in an annulus." *Nuclear Engineering and Design* 240.9 (2010): 2295-2303.
- [23] Wu, Y. W., et al. "Study on onset of nucleate boiling in bilaterally heated narrow annuli." *International journal of thermal sciences* 49.5 (2010): 741-748.
- [24] Kashi, M., Ramezani, A., Nazari, M., Shahmardan, M. (2018). 'Experimental Investigation and Visualization of Flow Boiling Heat Transfer in a Vertical Tube Containing Metal Porous Medium', *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 52(6), pp. 1595-1612. doi: 10.22060/mej.2018.14539.5880
- [25] Aminfar, H., M. Mohammadpourfard, and Y. Narmani Kahnamouei. "Numerical study of magnetic field effects on the mixed convection of a magnetic nanofluid in a curved tube." *International Journal of Mechanical Sciences* 78 (2014): 81-90.
- [26] Fang, Xiande, et al. "A method for developing correlations for subcooled flow boiling heat transfer and its application to water." *Fusion Engineering and Design* 129 (2018): 286-290.
- [27] Bower, Jason S., and James F. Klausner. "Gravity independent subcooled flow boiling heat transfer regime." *Thermal Sciences 2004. Proceedings of the ASME-ZSIS International Thermal Science Seminar II*. Begel House Inc., 2004.
- [28] Sugrue, Rosemary, Jacopo Buongiorno, and T. McKrell. "An experimental study of bubble departure diameter in subcooled flow boiling including the effects of orientation angle, subcooling, mass flux, heat flux, and pressure." *Nuclear Engineering and Design* 279 (2014): 182-188.
- [29] Maurus, Reinhold, and Thomas Sattelmayer. "Bubble and boundary layer behaviour in subcooled flow boiling." *International journal of thermal sciences* 45.3 (2006): 257-268.
- [30] Ahmadi, R., et al. "Experimental study of onset of subcooled annular flow boiling." *Progress in Nuclear Energy* 51.2 (2009): 361-365.
- [31] Anwar, Zahid, Björn Palm, and Rahmatollah Khodabandeh. "Flow boiling heat transfer and dryout characteristics of R152a in a vertical mini-channel." *Experimental thermal and fluid science* 53 (2014): 207-217.
- [32] Geping, W. U., et al. "Experimental research on flow instability in vertical narrow annuli." *Nuclear Science and Techniques* 18.4 (2007): 247-251.
- [33] Amirzehni, R., H. Aminfar, and M. Mohammadpourfard. "Experimental study of magnetic field effect on bubble lift-off diameter in sub-cooled flow boiling." *Experimental Thermal and Fluid Science* 89 (2017): 62-71.

- [34] Shah, M. Mohammed. "A general correlation for heat transfer during saturated boiling with flow across tube bundles." *HVAC&R Research* 13.5 (2007): 749-768.
- [35] Shah, M. Mohammed. "Improved general correlation for subcooled boiling heat transfer during flow across tubes and tube bundles." *HVAC&R Research* 11.2 (2005): 285-303.
- [36] Kim, Dongwoo, et al. "Comparison of 20 two-phase heat transfer correlations with seven sets of experimental data, including flow pattern and tube inclination effects." *Heat transfer engineering* 20.1 (1999): 15-40.
- [37] Chu, Y. C., and B. G. Jones. "Convective heat transfer coefficient studies in upward and downward, vertical, two-phase, non-boiling flows." *AIChE Symposium Series*. Vol. 76. 1980.
- [38] Aggour, Mohamed A. "Hydrodynamics and heat transfer in two-phase two-component flows." (1978).
- [39] Davis, E. J., and M. M. David. "Two-phase gas-liquid convection heat transfer. A correlation." *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* 3.2 (1964): 111-118.
- [40] Dorresteyn, W. R. "Experimental study of heat transfer in upward and downward two-phase flow of air and oil through 70-mm tubes." *International Heat Transfer Conference 4*. Vol. 26. Begel House Inc., 1970.
- [41] Dusseau, William Thomas. *Overall heat transfer coefficients for air-water froth in a vertical pipe*. Diss. Vanderbilt University, 1968.
- [42] Elamvaluthi, G., and N. S. Srinivas. "Two-phase heat transfer in two component vertical flows." *Int. J. Multiphase Flow;(United Kingdom)* 10.2 (1984).
- [43] Knott, R. F., et al. "An experimental study of heat transfer to nitrogen-oil mixtures." *Industrial & Engineering Chemistry* 51.11 (1959): 1369-1372.
- [44] Kudirka, ALVYDAS A., RICHARD J. Grosh, and P. W. McFadden. "Heat transfer in two-phase flow of gas-liquid mixtures." *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* 4.3 (1965): 339-344.
- [45] Martin, B. W., and G. E. Sims. "Forced convection heat transfer to water with air injection in a rectangular duct." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 14.8 (1971): 1115-1134.
- [46] Oliver, D. R., and S. J. Wright. "Pressure drop and heat transfer in gas-liquid slug flow in horizontal tubes." *British Chemical Engineering* 9.9 (1964): 590-596.
- [47] Ravipudi, S. R. "The effect of mass transfer on heat transfer rates for two-phase flow in a vertical pipe." *International Heat Transfer Conference Digital Library*. Begel House Inc., 1978.
- [48] Rezkallah, K. S., and G. E. Sims. "An examination of correlations of mean heat-transfer coefficients in two-phase two-component flow in vertical tubes." *Heat transfer: Pittsburgh 1987*. 1987.
- [49] Serizawa, Akimi, Isao Kataoka, and Itaru Michiyoshi. "Turbulence structure of air-water bubbly flow—III. Transport properties." *International Journal of Multiphase Flow* 2.3 (1975): 247-259.
- [50] MOHAMMED, SHAH, and MOHAMMED SHAH. "GENERALIZED PREDICTION OF HEAT TRANSFER DURING TWO COMPONENT GAS-LIQUID FLOW IN TUBES AND OTHER CHANNELS." (1981).
- [51] Groothuis, H., and W. P. Hendal. "Heat transfer in two-phase flow." *Chemical Engineering Science* 11.3 (1959): 212-220.
- [52] Hughmark, G. A. "Holdup and heat transfer in horizontal slug gas-liquid flow." *Chemical Engineering Science* 20.12 (1965): 1007-1010.

- [53] Khoze, A. N., S. V. Dunaev, and V. A. Sparin. "Heat and mass transfer in rising two-phase flows in rectangular channels." *Heat Transfer-Sov. Res.;(United States)* 8.3 (1976).
- [54] King, Cecil Dudley Gregg. *Heat Transfer and Pressure Drop for an Air-Water Mixture Flowing in a 0.737-inch ID Horizontal Pipe*. University of California, Berkeley, 1952.
- [55] T. Uede, and M. Hanaoka, "On upward flow of gas-liquid mixtures in vertical tubes: 3rd Report", *Heat Transfer Results and Analysis, Bulletin of JSME*, 42 (1967) 1008-1015.
- [56] Vijay, M. M., M. A. Aggour, and G. E. Sims. "A correlation of mean heat-transfer coefficients for two-phase two-component flow in a vertical tube." *International Heat Transfer Conference Digital Library*. Begel House Inc., 1982.
- [57] Sieder, E. Nn, and Go E. Tate. "Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes." *Industrial & Engineering Chemistry* 28.12 (1936): 1429-1435.
- [58] Dittus, Frederick William. "Heat transfer in automobile radiators of the tubler type." *Univ. Calif. Pubs. Eng.* 2 (1930): 443.
- [59] Chen, John C. "Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow." *Industrial & engineering chemistry process design and development* 5.3 (1966): 322-329.
- [60] Gungor, Kernal Ersin, and R. H. S. Winterton. "A general correlation for flow boiling in tubes and annuli." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 29.3 (1986): 351-358.
- [61] Liu, Z., and R. H. S. Winterton. "A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation." *International journal of heat and mass transfer* 34.11 (1991): 2759-2766.
- [62] Shah, Mirza M. "New correlation for heat transfer during subcooled boiling in plain channels and annuli." *International Journal of Thermal Sciences* 112 (2017): 358-370.
- [63] Sharqawy, Mostafa H. "New correlations for seawater and pure water thermal conductivity at different temperatures and salinities." *Desalination* 313 (2013): 97-104.
- [64] Zangeneh, A., et al. "Experimental study of forced convection and subcooled flow boiling heat transfer in a vertical annulus using different novel functionalized ZnO nanoparticles." *Applied Thermal Engineering* 109 (2016): 789-802.
- [65] Bejan, Adrian, and Allan D. Kraus, eds. *Heat transfer handbook*. Vol. 1. John Wiley & Sons, 2003.
- [66] Levy, Salomon. *Two-phase flow in complex systems*. John Wiley & Sons, 1999.
- [67] G.P.Celata, M.Cumo, Y.Katto, A.Mariania, "Critical Heat Flux Prediction for Saturated Flow Boiling of Water in Vertical Tubes", *Int.J.Heat and Mass Transfer*, Vol.44, pp.4323-4331(2001).
- [68] Zhu, Yu, et al. "Flow boiling of refrigerant in horizontal metal-foam filled tubes: Part 1–Two-phase flow pattern visualization." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 91 (2015): 446-453.
- [69] Zambrana, Jose, Teresa J. Leo, and Pedro Perez-del-Notario. "Vertical tube length calculation based on available heat transfer coefficient expressions for the subcooled flow boiling region." *Applied thermal engineering* 28.5-6 (2008): 499-513.
- [70] Okawa, Tomio, et al. "Bubble rise characteristics after the departure from a nucleation site in vertical upflow boiling of subcooled water." *Nuclear Engineering and Design* 235.10-12 (2005): 1149-1161.

- [71] D.Butterworth and G.F.Hewitt, "Two Phase Flow and Heat Transfer", Oxford University Press, 1977.
- [72] Wang, Guodong, and Ping Cheng. "Subcooled flow boiling and microbubble emission boiling phenomena in a partially heated microchannel." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52.1-2 (2009): 79-91.
- [73] Lee, Jaeseon, and Issam Mudawar. "Critical heat flux for subcooled flow boiling in micro-channel heat sinks." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52.13-14 (2009): 3341-3352.
- [74] C. Martín-Callizo, B. Palm, W. Owhaib, Subcooled flow boiling of R-134a in vertical channels of small diameter. *International Journal of Multiphase Flow*, 33(8) (2007) 822-832.
- [75] W. Owhaib, B. Palm, C. Martín-Callizo, Flow boiling visualization in a vertical circular minichannel at high vapor quality. *Experimental thermal and fluid science*, 30(8) (2006) 755-763.
- [76] X. Zhu, et al., An investigation on heat transfer characteristics of different pressure steam-water in vertical upward tube. *Nuclear Engineering and Design*, 239(2) (2009) 381-388.
- [77] H. Yu, R. Sheikholeslami, W.O. Doherty, Flow boiling heat transfer of water and sugar solutions in an annulus. *AIChE journal*, 50(6) (2004) 1119-1128.
- [78] Zhao, C. Y., W. Lu, and S. A. Tassou. "Flow boiling heat transfer in horizontal metal-foam tubes." *Journal of heat transfer* 131.12 (2009).
- [79] Ji, Xianbing, and Jinliang Xu. "Experimental study on the two-phase pressure drop in copper foams." *Heat and Mass Transfer* 48.1 (2012): 153-164.
- [80] Li, H. Y., and K. C. Leong. "Experimental and numerical study of single and two-phase flow and heat transfer in aluminum foams." *International journal of heat and mass transfer* 54.23-24 (2011): 4904-4912.
- [81] Madani, Brahim, Lounès Tadrist, and Frédéric Topin. "Experimental analysis of upward flow boiling heat transfer in a channel provided with copper metallic foam." *Applied thermal engineering* 52.2 (2013): 336-344.
- [82] Zhu, Yu, et al. "Influence of oil on nucleate pool boiling heat transfer of refrigerant on metal foam covers." *international journal of refrigeration* 34.2 (2011): 509-517.
- [83] Zhu, Yu, et al. "Influence of metal foam on heat transfer characteristics of refrigerant-oil mixture flow boiling inside circular tubes." *Applied thermal engineering* 50.1 (2013): 1246-1256.
- [84] Abadi, Gholamreza Bamorovat, Chanhee Moon, and Kyung Chun Kim. "Flow boiling visualization and heat transfer in metal-foam-filled mini tubes—Part I: flow pattern map and experimental data." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 98 (2016): 857-867.
- [85] Abadi, Gholamreza Bamorovat, Chanhee Moon, and Kyung Chun Kim. "Flow boiling visualization and heat transfer in metal-foam-filled mini tubes—Part II: Developing predictive methods for heat transfer coefficient and pressure drop." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 98 (2016): 868-878.
- [86] M.G. Kang, Effects of pool subcooling on boiling heat transfer in a vertical annulus with closed bottom. *International journal of heat and mass transfer*, 48(2) (2005) 255-263.
- [87] Mancin, Simone, et al. "Experimental air heat transfer and pressure drop through

- copper foams." *Experimental thermal and fluid science* 36 (2012): 224-232.
- [88] S. Mancin, C. Zilio, L. Rossetto, A. Cavallini, Heat transfer performance of aluminum foams, *J. Heat Transfer* 133 (6) (2011).
- [89] S. Mancin, C. Zilio, L. Rossetto, A. Cavallini, Foam height effects on heat transfer performance of 20 ppi aluminum foams, *Appl. Therm. Eng.* (2011).
- [90] Mancin, Simone, et al. "R134a and R1234ze (E) liquid and flow boiling heat transfer in a high porosity copper foam." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 74 (2014): 77-87.
- [91] Diani, Andrea, et al. "Low-GWP refrigerants flow boiling heat transfer in a 5 PPI copper foam." *International Journal of Multiphase Flow* 76 (2015): 111-121.
- [92] Ji, Xianbing, et al. "Pool boiling heat transfer on uniform and non-uniform porous coating surfaces." *Experimental thermal and fluid science* 48 (2013): 198-212.
- [93] Jens, Wayne Henry, and P. A. Lottes. Analysis of heat transfer, burnout, pressure drop and density data for high-pressure water. No. ANL-4627. Argonne National Lab., 1951.
- [94] Thom, J. R. S., W. W. Walker, T. A. Fallon, and G. F. S. Reising. "Boiling in Subcooled Water During Flow Up Heated Tubes or Annuli, Symposium on Boiling Heat Transfer in Steam Generating Units and Heat Exchangers, Paper." (1965): 6.
- [95] Hasan, A., R. P. Roy, and S. P. Kalra. "Experiments on subcooled flow boiling heat transfer in a vertical annular channel." *International journal of heat and mass transfer* 33, no. 10 (1990): 2285-2293.
- [96] Li, Yuanjie, Shuai Ren, Shiwei Zhang, Xingchi Jiang, and Chin Pan. "Subcooled flow boiling of seawater in a vertical annulus." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 164 (2021): 120591.

Abstract

The boiling heat transfer, especially the subcooled flow boiling, is one of the cooling systems being used in industries due to their high heat transfer coefficient. The subcooled flow boiling happens when the bulk flow temperature and the interface temperature are lower and higher, respectively than the saturated temperature corresponding to the flow pressure. One way to increase heat transfer is through high porosity metal foams in the channel, which have a large surface area relative to the volume, increasing heat as well as heat transfer. The present study has experimentally investigated the porous effect on subcooled flow boiling in a vertical annulus tube with inner diameter of 50.7 mm and outer diameter of 70.6 mm, by providing an open-loop experimental setup. The tube is filled with 10 PPI open-cell nickel metal foam. The effects of different parameters such as heat flux, mass flow rate (ranging from 0.012 to 0.0286 kg/s), and the inlet subcooling temperature (i.e., 35–50°C) on heat transfer coefficients are explored. The theoretical relations also validate the heat fluxes in the subcooled boiling regime. The results revealed that increasing the heat flux leads to an increase in the subcooled flow boiling heat transfer coefficient. The heat transfer coefficient is a function of mass flow rate for a given heat flux. In the subcooled boiling heat transfer zone, the wall temperature remains almost constant, and no significant changes were observed in the experiments. Hence, if the mass flow rate decreases in this zone, the bulk temperature will be increased while the wall temperature is constant. Also, the subcooled heat transfer coefficient increases with a decrease in inlet subcooling temperature. Using 10 PPI nickel porous inside the annular tube, the subcooled boiling heat transfer coefficient can be increased up to 30% compared to an empty tube.

Keywords: heat transfer, subcooled flow boiling, annulus, metal foam.



Shahrood University of
Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering
Ph.D. Thesis in Mechanical Engineering

Experimental Investigation of the Effects of Porous Medium on Subcooled Flow Boiling Heat Transfer in a Vertical Annulus Tube

By: Masoud Yarahmadi

Supervisor:
Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan

Advisor:
Dr. Mohsen Nazari

February, 2022