

اندازه گیری تجربی شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت آب مقطر در جوشش جریان

محمدسجاد کرامتی نیا^{۱*}، آرش محمدی^۲، علیمراد رشیدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۳- استاد، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران

• تهران، ۱۶۷۸۸۱۵۸۱۱، mohammadsajjadkeramati@gmail.com

چکیده

با توجه به اینکه حدود نصف انرژی آزاد شده سوخت درون موتور احتراق داخلی از طریق انتقال حرارت به سیال خنک کننده به محیط دفع می‌شود، از این رو طراحی سیستم خنک کاری در آنها بسیار اهمیت دارد. خنک کاری بیش از حد بازده موتور را کاهش می‌دهد و کاهش میزان خنک کاری باعث تشکیل لایه بخار روی سطح راهگاه آب و آسیب قطعات می‌شود. از این رو به منظور طراحی مناسب سیستم خنک کاری به دانشی دقیق در زمینه انتقال حرارت از طریق جابجایی اجباری و جوشش جریانی نقطه‌ای مورد نیاز است. در این تحقیق با ساخت ستاپ آزمایشگاهی اثر جوشش جریانی بر روی میزان انتقال حرارت از آب مقطر بررسی شده است. با توجه به هندسه این ناحیه کانالی به ارتفاع ۶ و عرض ۴ سانتی متر در نظر گرفته شده است. اثر سرعت و دمای ورودی روی میزان انتقال حرارت بررسی شده است. نمودارهای میزان شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت در برابر دمای سطح در این پژوهش بدست آمده است.

کلیدواژگان

جوشش جریانی، شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت

Experimental measurement of heat flux and heat transfer coefficient of distilled water in flow boiling

Mohammad Sajjad Keramati Nia^{1*}, Arash Mohammadi², Alimorad Rashidi³

1- Department of mechanical engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

3- Nanotechnology Research Center, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

* 1678815811, Tehran, Iran, mohammadsajjadkeramati@gmail.com

Abstract

Approximately half of fuel heat release in an IC engine is loosed to environment by coolant flow. So, cooling system design is very important for an IC engine. High cooling decreases efficiency of an engine and low cooling lead to vapor film formation on the water jacket and damages to engine components. Therefore, for designing an appropriate cooling-system, precise background in forced convection and flow boiling is necessary. In this research, an experimental setup was designed to investigate the effect of flow boiling on heat transfer distilled water. Boiling takes place on hot spot of water jacket with low speed of coolant. With consider to geometry of Valve Bridge, a cubic canal with 6×4 has considered. Effects of inlet velocity and temperature on rate of heat transfer studied. Graphs of heat flux and heat transfer coefficient versus surface temperature, has achieved.

Keywords

Flow boiling, Heat flux, Heat transfer coefficient

۱- مقدمه

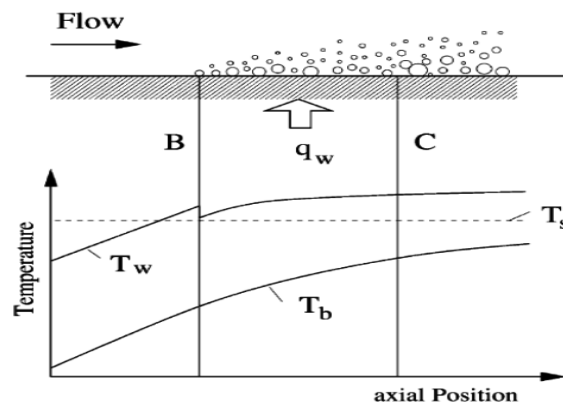
کمپل و همکاران [۴-۵] شار حرارتی و دمای سطح در یک کانال مستطیل شکل که توسط گرماساز کوچکی حرارت داده می‌شد، بدست آوردند. مهمترین تفاوت بین تحقیقات مکاسی و کمپل در شرایط دما و سرعت سیال ورودی میباشد. آمبروگی و همکاران [۶] شار حرارتی و دمای سطح در یک کانال دایره‌ای و مستطیلی بررسی کردند. آنها دما را در طول کانال دایره‌ای و مستطیل شکل که به صورت یکنواخت حرارت داده می‌شد، بدست آوردند. همچنین اندر و اونیل [۷] با ثابت نگه داشتن دما و سرعت ورودی در یک کانال مستطیل شکل حساسیت به شرایط ورودی را بررسی کردند.

هدف از انجام این پژوهش بررسی پدیده جوشش نقطه‌ای و اندازه گیری شار حرارتی ضریب انتقال حرارت جوشش در یک محفظه مستطیل شکل و شفاف می‌باشد. همچنین بدست آوردن منحنی‌هایی می‌باشد که تاثیر تغییرات سرعت و دمای بالک را بر روی جوشش نشان می‌دهند. پارامترهای سرعت و دمای سیال ورودی بر نرخ انتقال حرارت و پدیده جوشش بررسی شده است.

وظیفه سیستم خنک کننده محدود کردن بیشینه دمای قطعات موتور احتراق داخلی به منظور جلوگیری از آسیب های ناشی از افزایش دما می‌باشد. سیستم خنک کننده، دمای روغن و انبساط دمایی برخی اجزاء و همچنین دمای محفظه احتراق را تنظیم می‌کند. برای گسترش سیستم خنک کاری نیاز به یک دید کلی از مشخصات مهمی مانند تاثیر فشار، دبی، دمای ورودی و دمای سطح بر روی نرخ انتقال حرارت داریم. استفاده از انتقال حرارت به واسطه جوشش جریانی در سیستم خنک کاری موتور به واسطه افزایش انتقال حرارت دارای مزیت می‌باشد. با وجود اینکه جوشش دارای ویژگی های انتقال حرارت خوبی می‌باشد ولی امکان پیش بینی کردن جوشش در موتور به علت هندسه پیچیده درون راهگاه آب بسیار مشکل است. پژوهش‌هایی در این زمینه انجام گرفته است مانند پژوهش انجام گرفته توسط مکاسی و همکاران [۱-۳] که شار حرارتی و دمای سطح را در یک کانال دایره‌ای که به صورت سرتاسری حرارت داده می‌شد، بدست آوردند.

۲- مروری بر پدیده جوشش

از ترمودینامیک می‌دانیم که اگر دمای دیوار بالاتر از دمای اشباع سیال نزدیک آن باشد، آنگاه جوشش رخ می‌دهد. در بسیاری از کاربردها از فرآیند جوشش برای افزایش نرخ انتقال حرارت استفاده می‌شود که این به دلیل بالا بودن ضریب انتقال حرارت جوشش نسبت به انتقال حرارت جابجایی است. اساس فرآیند جوشش بر مبنای تولید حباب می‌باشد. با گذر دمای دیوار از دمای اشباع سیال، حباب تشکیل شده و رفته رفته بر اثر حرارت دیوار، بزرگ می‌شود. اگر سرعت سیال و برآیند نیروها به گونه‌ای باشد که بتواند حباب را از دیوار جدا نمود، حباب وارد ناحیه‌ای با دمای پایین‌تر از دمای اشباع شده و چگالیده می‌شود. این رخداد دمای سیال لایه میانی را افزایش داده و منجر به جایگزینی سیال خنک لایه‌های بالایی به جای حباب می‌شود. با این عمل سیال نزدیک دیوار مقدار انرژی زیادی را جابجا می‌کند، به عبارتی سیال با دمای پایین‌تر، به نزدیکی دیوار داغ آمده، حرارت جذب می‌کند و انرژی نهان برای تغییر فاز را از دیوار جذب می‌نماید و بعد به لایه‌های بالایی منتقل می‌گردد (شکل ۱).



شکل ۱ نمودارهای دمای دیواره داغ و سیال در جوشش مادون‌سرد

نکته مهم آن است که انرژی جذب شده مقدار بسیار بزرگتری در مقایسه با انرژی جابجا شده توسط مکانیزم جابجایی می‌باشد. با افزایش دمای دیوار، تعداد حباب‌های ایجاد شده در دیوار افزایش می‌یابد و این موجب می‌گردد که ضریب انتقال حرارت افزایش چشم‌گیری یابد. اگر سرعت تشکیل حباب از سرعت جدا شدن آن از دیوار بیشتر باشد، باعث می‌شود تا حباب‌ها به هم متصل شوند و در نهایت یک لایه بخار روی دیوار شکل بگیرد. به این پدیده تشکیل فیلم بخار روی سطح، جوشش فیلمی گویند. همچنین به ناحیه گذر از حالت جوشش هسته‌ای به جوشش فیلمی نیز ناحیه گذر گویند. این لایه هوا به علت دارا بودن ضریب انتقال حرارت هدایت پایین همانند عایق عمل کرده و موجب می‌شود تا دمای دیوار به شدت بالا برود. ناحیه جوشش حبابی از دو ناحیه جوشش مادون‌سرد و جوشش اشباع تشکیل شده است که تفاوت آن‌ها در دمای توده سیال می‌باشد. در جوشش حبابی مادون‌سرد دمای توده سیال کمتر از دمای اشباع بوده درحالی‌که در جوشش حبابی اشباع دمای توده سیال برابر دمای اشباع است.

در ناحیه جوشش مادون‌سرد، به علت دمای کمتر توده سیال نسبت به دمای اشباع، حباب پس از صعود از دیوار در سیال چگالیده می‌شود و دمای سیال

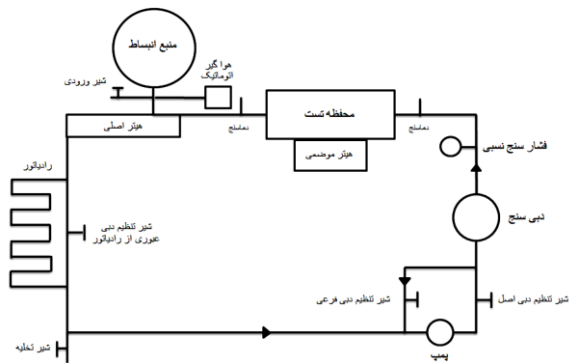
بالا می‌رود. قبل از آن که دمای توده سیال به دمای اشباع برسد، حباب‌ها چگالیده می‌شوند اما با رسیدن دمای توده سیال به دمای اشباع، حباب‌های تولیدی دیگر از بین نرفته و همراه با جریان حرکت می‌کنند. در صورت عدم کنترل، حبابها می‌توانند همچون عایقی سطح دیوار را پوشانده و منجر به افزایش شدید دمای دیوار و کاهش شار عبوری از دیوار می‌شود. زمانی که یک حباب تشکیل می‌شود، جریان از حالت تک فاز خارج شده و به حالت دو فاز تبدیل می‌شود. در شکل‌گیری حباب و ایجاد هسته‌های حباب بحث‌های متنوعی مطرح می‌شود که به طور معمول از کارهای آماری و تجربی نتایج بهتری حاصل شده است. در مدل‌سازی انتقال حرارت و هیدرودینامیک سیال بایستی اثر متقابل حباب، سیال و دیواره جامد دیده شود. می‌توان این اثر متقابل را به چهار دسته زیر تقسیم‌بندی کرد: ۱. اثر متقابل حرارتی حباب و دیواره جامد ۲. اثر متقابل حرارتی هسته تولید حباب در دیواره جامد ۳. اثر متقابل دینامیکی حباب و سیال ۴. اثر متقابل دینامیکی حباب‌ها

۳- ستاپ آزمایشگاهی

مجموعه ساخته شده از سه بخش کلی تشکیل شده است:

۱. چرخه جریان
۲. محفظه تست
۳. گرماساز موضعی

تجهیزات مورد استفاده در این مجموعه آزمایشگاهی شامل لوله‌هایی از جنس گالوانیزه، پمپ جهت چرخش سیال در مدار بسته، گرماساز داخلی و گرماساز موضعی جهت بالابردن دمای بالک سیال و دمای منطقه تست، منبع انبساط جهت خنثی کردن افزایش فشار ناشی از زیاد شدن دما می‌باشد. همچنین مجموعه خنک‌کاری جداگانه جهت تنظیم کردن دمای بالک سیال وجود دارد. مجموعه‌ای برای داده‌برداری و ثبت داده‌های فشار، دما و دبی جریان در این مجموعه به کار گرفته شده است. منطقه تست از مهمترین قسمت‌های این چرخه می‌باشد که از قسمت‌های مختلفی درست شده است. این منطقه دارای یک کانال جریان مستطیل شکل به ابعاد ۴۰ میلی متر ارتفاع و ۶۰ میلی متر عرض با دو طرف شیشه‌ای شفاف و یک طرف سطح آلومینیومی قطعه تست تشکیل شده است.



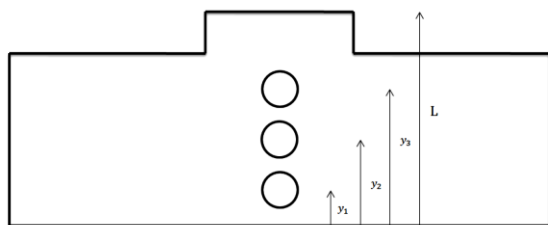
شکل ۲ شماتیک ستاپ آزمایشگاهی

۴- فرضیات در نظر گرفته شده برای انجام آزمایش

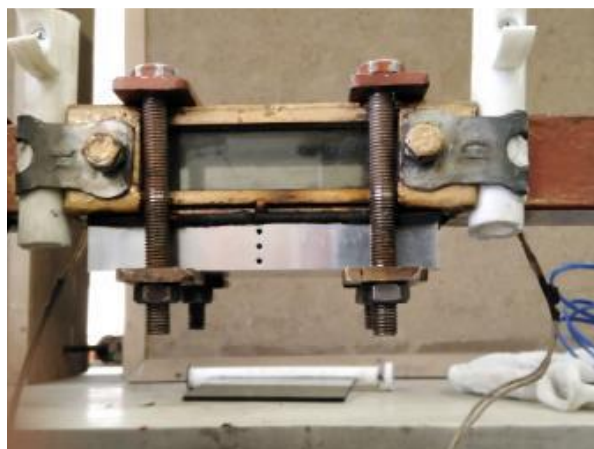
- انتقال حرارت در صفحه تست تک بعدی بوده و از انتقال به محیط پیرامون صرف نظر شده است.
- فشار در منطقه گرما ساز با فشار خوانده شده توسط گیج در مسیر سیال برابر می باشد؛ لذا از افت و تغییرات فشار صرف نظر شده است.
- در هر لحظه سیستم در حالت پایدار می باشد. این فرضیه مهمترین تاثیر را در اندازه گیری دمای سطح و شار حرارتی دارد. زیرا هر دو این اندازه گیری ها به تغییرات دما در سرتاسر الومینیوم بستگی دارند.

۵- محاسبه تجربی شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت

- سرعت سیال : دبی سیال از روی دبی سنج خوانده می شود و در طی یک آزمایش ثابت می ماند. با داشتن دبی سیال با توجه به مساحت سطح مقطع منطقه تست، سرعت سیال در محفظه تست از طریق فرمول (۱) محاسبه می شود.
- شار حرارتی : در صفحه الومینیومی محفظه تست، سه دماسنج در یک راستا و با فاصله برابر از هم قرار دارد که در هر لحظه میتوان یک معادله درجه دو از این سه نقطه طبق فرمول (۲) عبور داد.
- ضریب انتقال حرارت : برای محاسبه ضریب انتقال حرارت ابتدا میانگین دما محفظه تست را با توجه به دو دماسنج منطقه تست محاسبه می کنیم، سپس از طریق فرمول (۵) ضریب انتقال حرارت بر حسب W/Km^2 محاسبه میشود.

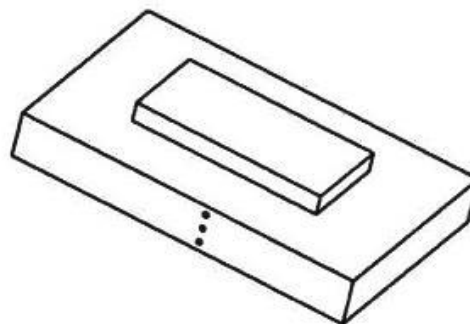


شکل ۵ جانمایی دماسنج ها



شکل ۳ منطقه تست

کانال مستطیلی استفاده شده در این آزمایش به ارتفاع ۴۰ میلی متر و عرض ۶۰ میلی متر می باشد. در دو طرف منطقه تست ترموکوپل از نوع K قرار داده شده است برای سنجش لحظه ای دمای جریان سیال که میانگین دمای این دو ترموکوپل را با T_{avg} نمایش می دهیم. تجهیزات استفاده شده در منطقه گرمایش شامل گرماساز برقی با توان 1KW می باشد.



شکل ۴ سه نمای قطعه تست

جدول ۲ فرمول های مورد استفاده

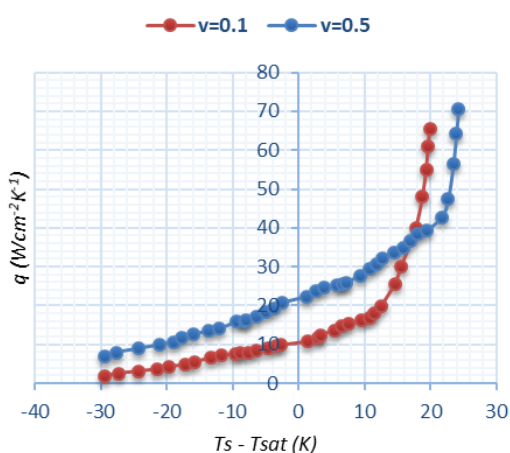
$v = \frac{q}{A}$	(1)
$T = aY^2 + bY + c$	(2)
$q = -K \frac{dT}{dY}$	(3)
$q = -K(2aY + b)$	(4)
$h = \frac{q}{T_s - T_{avg}}$	(5)

همانطور که در شکل (۴) مشاهده میکنید صفحه تست که قطعه ای یک پارچه است که قسمت فوقانی آن در محفظه تست قرار میگیرد و روی لبه ی آن واشر آب بندی قرار می گیرد.

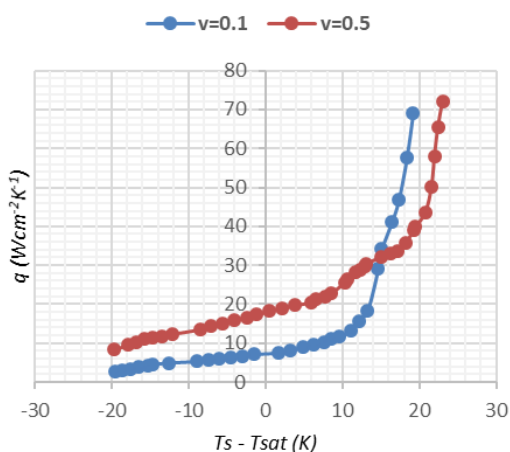
جدول ۱ مقادیر لازم برای انجام محاسبات

0.025 m	L (m)	طول
95.1	T_{sat} (°C)	دمای اشباع
240	$K (Wm^{-1}K^{-1})$	ضریب انتقال حرارت الومینیوم

* ضریب هدایت حرارتی آلومینیوم در دمای کاری ستاپ با تقریب خوبی مقدار بالا را دارد.



شکل ۶ تاثیر تغییر سرعت آب مقطر بر شار حرارتی در دمای ورودی 60°C و فشار 0.87 atm



شکل ۷ تاثیر تغییر سرعت آب مقطر بر شار حرارتی در دمای ورودی 70°C و فشار 0.87 atm

همان‌طور که در منحنی‌ها نشان داده شده است با افزایش سرعت شیب منحنی‌ها افزایش پیدا می‌کند و فرآیند جوشش متوقف می‌گردد. که این یک پدیده شناخته شده در جوشش جریان می‌باشد. معمولاً برای شروع جوشش نیاز به اختلاف دما مافوق گرم می‌باشد.

۶- شرایط آزمایش

فشار در حدود 0.87 atm ثابت نگه داشته شده است. میزان دبی در این پژوهش برابر با $3.88\text{ m}^3/\text{h}$, $0.77\text{ m}^3/\text{h}$ می‌باشد. همچنین دمای سیال ورودی به منطقه تست 60°C , 70°C می‌باشد. بیشینه شار حرارتی در این پژوهش $75\text{ W}/\text{cm}^2$ می‌باشد.

۷- آنالیز خطا

عدم قطعیت در ترموکوپل‌های نوع K برابر با $\pm 1^{\circ}\text{C}$ یعنی کمتر از 1% می‌باشد.

عدم قطعیت در دبی جریان برابر با $0.1\text{ lit}/\text{min}$ یعنی 1% می‌باشد. فشارسنج از نوع عقربه‌ای می‌باشد که توانمندی خوانش فشار مطلق تا 9 bar را دارد و خطای خوانش آن حدود 0.5% می‌باشد. بر اساس عدم قطعیت‌های ذکر شده، میزان عدم قطعیت شار حرارتی برابر با 5% شار حرارتی اندازه‌گیری شده می‌باشد.

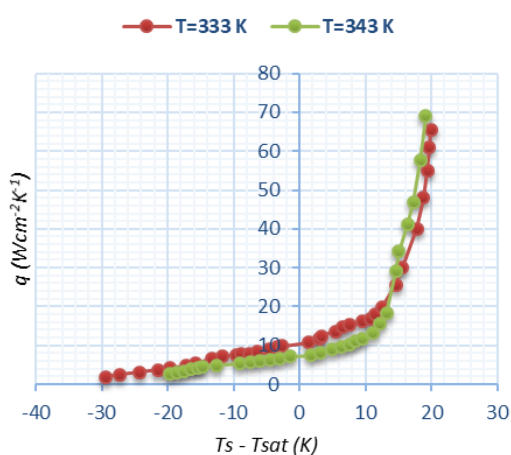
۸- نتایج تست برای آب مقطر

منحنی‌های بدست آمده برای آب مقطر تاثیر تغییر سرعت در دمای ثابت بر روی شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت را نشان می‌دهد. همچنین منحنی‌های تغییر دما در سرعت ثابت برای شار حرارتی نیز نشان داده شده است. این منحنی‌ها با ثابت نگه داشتن فشار سیستم و تغییر در دبی سیال در دمای ثابت و تغییر در دمای سیال در سرعت ثابت رسم شده است. محور افقی اختلاف دمای سطح و دمای اشباع می‌باشد و محور عمودی شار حرارتی که در شکل‌های (۶) و (۷) ترسیم شده است.

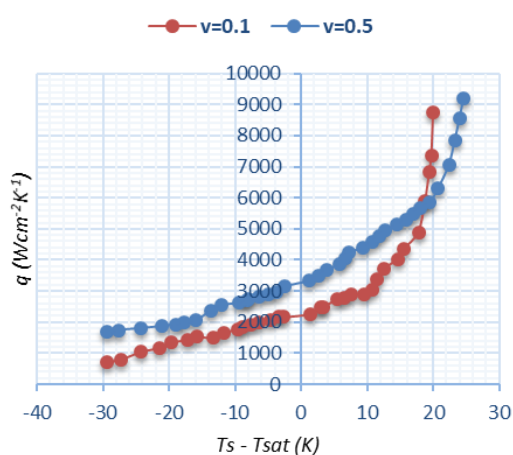
برای نشان دادن اثر پدیده جوشش، اختلاف دما نسبت به دمای اشباع در نظر گرفته شده است. هر کدام از منحنی‌ها یک محدوده خطی دارند که بیانگر ثابت بودن ضریب انتقال حرارت در آن محدوده می‌باشد. با توجه به منحنی‌های بدست آمده مشاهده می‌شود انتقال حرارت تک فاز به شدت به پارامتر سرعت بستگی اما بعد از شروع جوشش انتقال حرارت از طریق جوشش تابع شار حرارتی می‌باشد به این صورت که با افزایش شار حرارتی ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند.

در این مرحله منحنی‌های نشان داده در شکل های (۱۰) و (۱۱) که با افزایش دما شیب نمودار کاهش می‌یابد. یعنی هرچه دما چابین‌تر باشد، در ناحیه جابجایی شار حرارتی بیشتر است و هرچه دمای سیال ورودی بیشتر باشد در دمای سطح کمتری جوشش شروع می‌شود. این پدیده قابل پیش بینی نیز بود چرا که در دماهای ورودی پایین تر، انرژی بیشتری باید به سیال انتقال کند تا به نقطه جوش برسد.

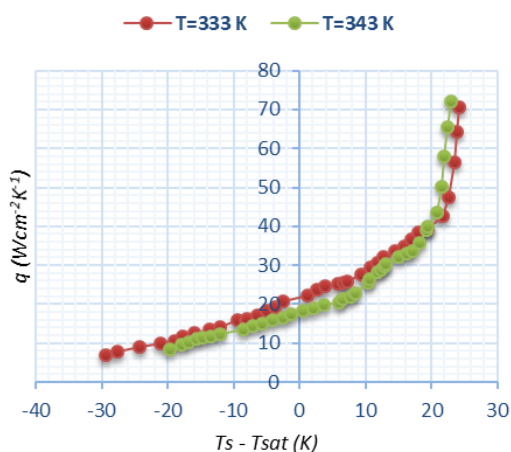
منحنی‌های رسم شده در شکل‌های (۹) و (۱۰) به صورت ضریب انتقال حرارت نسبت به اختلاف دمای سطح ترسیم گردیده‌اند. در این منحنی‌ها در محدوده انتقال حرارت تک فاز ضریب انتقال حرارت تابع سرعت می باشد. در محدوده‌ای که جوشش اتفاق می‌افتد ضریب انتقال حرارت تابع شار حرارتی می‌باشد، بدین صورت که با افزایش شار حرارتی ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند. که این یک پدیده مفید برای تجهیزاتی می‌باشد که از فرآیند جوشش در خنک‌کاری استفاده می‌کنند.



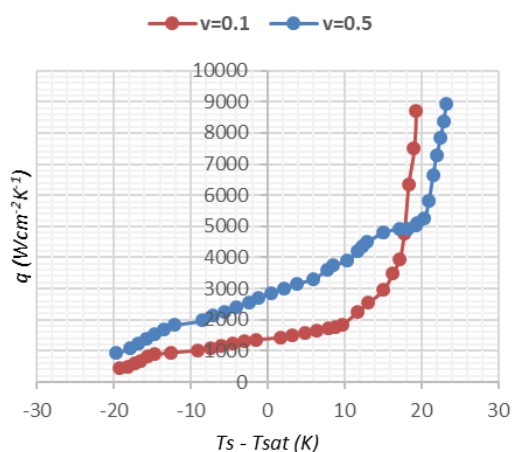
شکل ۱۰ تاثیر تغییر دمای ورودی آب مقطر بر شار حرارتی در سرعت 0.1 m/s و فشار 0.87 atm



شکل ۸ تاثیر تغییر سرعت بر ضریب انتقال حرارت آب مقطر در دمای ورودی 60 °C و فشار 0.87 atm



شکل ۱۱ تاثیر تغییر دمای ورودی آب مقطر بر شار حرارتی در سرعت 0.5 m/s و فشار 0.87 atm

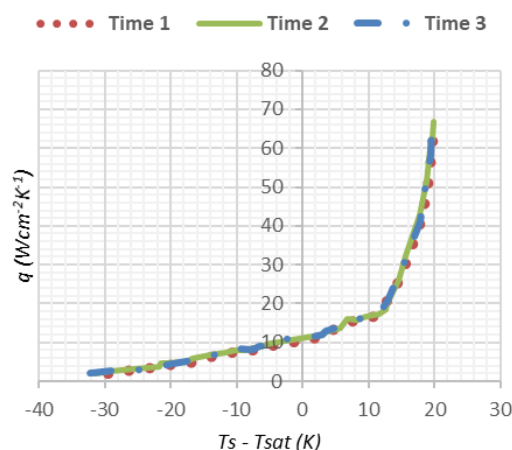


شکل ۹ تاثیر تغییر سرعت بر ضریب انتقال حرارت آب مقطر در دمای ورودی 70 °C و فشار 0.87 atm

همان‌طور که در منحنی‌ها نشان داده شده است با افزایش سرعت، شیب منحنی‌ها افزایش پیدا می‌کند و فرآیند جوشش متوقف می‌گردد که این یک پدیده شناخته شده در جوشش جریان می‌باشد. معمولاً برای شروع جوشش نیاز به اختلاف دما مافوق گرم می‌باشد.

۹- تکرارپذیری آزمایش‌ها

در انجام این پژوهش برای بدست آوردن داده‌ها و منحنی‌های قابل اعتماد آزمایشات طی چند مرحله انجام گرفته است که به عنوان نمونه تعدادی از منحنی‌ها در شکل‌های پایین نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۲ تکرار آزمایش آب مقطر در دمای ورودی 70 °C و فشار 0.87 atm با سرعت 0.1 m/s

۱۲- مراجع

- [1] Gollin, M., McAssey, E. V., and Stinson, C. Comparative performance of ethylene glycol/water and propylene glycol/water coolants in the convective and forced flow boiling regimes. SAE paper 950464, 1995.
- [2] McAssey Jr, E. V., Stinson, C., and Gollin, M. Evaluation of engine coolants under flow boiling conditions. In Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, vol. 1, 1995, HTD-Vol.317-1, pp.193-200 (ASME International, New York).
- [3] Bhowmick, S., Branchi, C., McAssey Jr, E. V., Gollin, M., and Cozzone, G. Prediction of heat transfer in engine cooling systems. In Proceedings of the Fourth World conference on Experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics, Brussels, Belgium, 1997, pp. 387-392 (Professional Engineering Publishing, London).
- [4] Campbell, N. A. F., Hawley, J. G., Robinson, K., Joyce, S., and Haigh, M. Prediction for nucleate boiling – results from a thermal bench marking exercise under low flow conditions. SAE paper 2002-01-1028, 2002.
- [5] Campbell, N. A. F., Tilley, D. G., MacGregor, S. A., and Wong, L. Incorporating nucleate boiling in a precision cooling strategy for combustion engines. SAE paper 971791, 1997.
- [6] Ambrogio, G., McAssey Jr, E. V., Cozzone, G., and Hoover, C. The effect of off-design operation on the thermal performance of propylene-glycol and ethylene-glycol engine coolants. SAE paper 971827, 1997.
- [7] Lee, H. S. and O'Neill, A. T. Boiling curves and visual observations of subcooled flow boiling of water over a horizontal plate heater in a rectangular channel. In Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, Florida, USA, 5-11 November 2005, paper IMECE 2005-79390 (ASME International, New York).

۱۰- فهرست علائم

q	شار حرارتی ($Wcm^{-2}K^{-1}$)
K	ضریب انتقال حرارت جامدات ($Wm^{-1}K^{-1}$)
h	ضریب انتقال حرارت ($Wm^{-1}K^{-1}$)
T	دما (K)
Y	ارتفاع از سطح (m)
$a \cdot b \cdot c$	ضرایب معادله درجه دو
T_s	دمای سطح (K)
T_{avg}	میانگین دمای دو طرف منطقه تست (K)

۱۱- نتیجه‌گیری

- (۱) شیب منحنی‌ها با افزایش سرعت در سیال افزایش پیدا می‌کند.
- (۲) با افزایش سرعت روند تولید حباب متوقف می‌گردد.
- (۳) ضریب انتقال حرارت در محدوده جوشش (دوفاز) تابع شار حرارتی می‌باشد.
- (۴) ضریب انتقال حرارت در محدوده انتقال حرارت جابجایی (تکفاز) تابع سرعت می‌باشد.
- (۵) با افزایش دمای سیال ورودی ضریب انتقال حرارت کاهش پیدا می‌کند.