



## مطالعه آزمایشگاهی انتقال حرارت در جوشش جریان‌ی آمیل هیدرید در فضای حلقوی

سید امیر موسوی

گروه مهندسی شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

سمیرا امن پور مقدم

گروه مهندسی پلیمر، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

یلدا زارع زاده

گروه مهندسی شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

سجاد پناهی

گروه مهندسی پزشکی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

حامد علمی

گروه مهندسی پلیمر، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

### چکیده

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت جوشش جریان‌ی آمیل هیدرید در فضای حلقوی عمودی پرداخته شده و اثر پارامترهایی مانند شار، دبی و دمای ورودی سیال بر روی ضریب انتقال حرارت بررسی می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در طول تمام مراحل آزمایش انتقال حرارت از دو مکانیسم جابه‌جایی اجباری و جوشش جریان‌ی تشکیل می‌یابد که اثر هر یک از پارامترهای فوق بر روی این دو مکانیسم انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه نتایج حاصل از انجام آزمایش با مدل‌های تجربی معتبر و دقیق Dittus-Boelter و Gnielinski و مدل ترکیبی چن Chen که ترکیبی از جابه‌جایی اجباری و انتقال حرارت جوششی هسته زایی است مقایسه گردید. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که مدل‌های گلینسکی و دیتوس بولتر در ناحیه جابه‌جایی اجباری به خوبی ضریب انتقال حرارت را پیش‌بینی می‌کنند. حال آن‌که در نواحی که انتقال حرارت شدید منجر به تشکیل حباب روی سطح می‌گردد، به دلیل تغییر مکانیسم انتقال حرارت از جابه‌جایی به هسته زایی، مدل چن پیش‌گویی دقیق‌تری از ضریب انتقال حرارت ارائه می‌نماید.

**کلید واژه:** آمیل هیدرید، جوشش جریان‌ی، انتقال حرارت، جوشش هسته‌ای

## ۱- مقدمه

امروزه کم‌تر تجهیز و دستگاهی را در صنعت شاهد هستیم که به نوعی، درگیر انتقال حرارت نباشد حال این که انتقال حرارت در بعضی فرآیندها منجر به جدایی دو فاز یا بیش‌تر می‌گردد و در جای دیگر اساس طراحی برای محاسبه میزان حجم و نوع تجهیز مستلزم دانستن مقدار و چگونگی انتقال آن است. بیش‌ترین تاثیرگذاری و کاربرد آن را می‌توان در صنایع پتروشیمی، نفت، گاز و نیروگاه‌های اتمی مشاهده کرد. در بیش‌تر این صنایع، فرآیندها در دمایی نزدیک به دمای جوش اتفاق می‌افتد بنابراین با انتقال حرارت جوشی مواجه خواهیم بود. با توجه به اهمیت انتقال حرارت جوشی در صنعت، بررسی عوامل تاثیرگذار بر آن مانند ضریب انتقال حرارت از اهمیت بیش‌تری برخوردار است زیرا که محاسبه این ضریب هم از لحاظ زمانی و هم از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود و دانستن مقدار آزمایشگاهی و عوامل تاثیر گذار بر آن کمک شایانی به طراحی بهینه تجهیزات در صنایع می‌نماید. برای درک کردن بهتر اهمیت انتقال حرارت جوشی -جریانی و عوامل تاثیرگذار بر آن به مروری گذرا بر کارهای محققین در گذشته پرداخته می‌شود. در سال ۱۹۶۶ دانشمندان سیمون و سیمونو [۱] جوشش نیتروژن را در دو حالت جریان بالا به پایین و پایین به بالا مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که در حالت جریان به سمت پایین تجمعات فضای خالی بیش‌تر است هم‌چنین دریافتند که در حالتی که جوشش هسته‌ای اتفاق می‌افتد ممکن است ضرایب انتقال حرارت متفاوتی در حالت عمودی رو به بالا یا رو به پایین به دست آید. چن و همکارش [۲] در سال ۱۹۷۹، با مطالعه بر روی فرکانس تشکیل حباب در محلول‌های سردساز، به رابطه سطح انتقال حرارت و زاویه تماس سطح گرم با سیال پی بردند و ثابت کردند که با چرخش سطح تماس و تغییر زاویه تماس، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. آن‌ها در ادامه مطالعات خود مدل معروف خود را که برای ناحیه تشکیل حباب به دست آمده بود را ارائه نمودند. ستینگ

هاگن [۳] در سال ۱۹۸۶ نشان داد که ضریب انتقال حرارت جوشش با افزایش شار افزایش و با افزایش فشار کاهش می‌یابد. در ادامه کار در سال ۱۹۹۳ آقای کلاسنر [۴] در حالت جوشش اجباری اندازه قطر حباب را مورد بررسی قرار داد و نشان داد قطر حباب برای شارهای حرارتی بالا کوچک‌تر است. چن در سال ۱۹۹۸ دینامیک حباب را برای جوشش و جوشش استخری را در حالت استوانه‌ای مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند قطر حباب برای شارهای حرارتی بالا کوچک‌تر است. در سال ۱۹۹۹ کلاسنر و تورنکروف روی سطح لیز و صاف انتقال حرارت را مورد بررسی قرار دادند. باز در سال ۱۹۹۹ تورنکروف [۵] نشان داد که رشد حباب‌ها و زاویه جدایش حباب با FC87 افزایش عدد ژاکوبین افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۰۸ آقایان هسیه و لین [۶] ضریب انتقال حرارت جریان جوشی در حالت آدیاباتیک در مجرای افقی اندازه‌گیری کردند R407C. اشباع برای ماده در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی نرمال هپتان به‌عنوان یک ماده سردساز با خواص ویژه در حالت انتقال حرارت، جوشی جریانی در فضای عمودی حلقوی پرداخته می‌شود و نتایج آن در حالت جابه‌جایی اجباری با دو مدل تجربی گلینسکی و دیتوس بویلتر مقایسه می‌شود و در قسمت جوشش جریانی با مدل چن مقایسه خواهد شد.

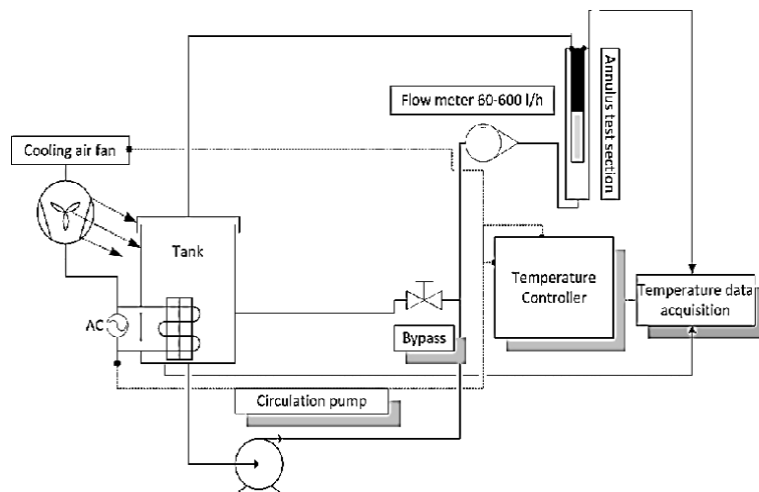
## ۲- سیستم آزمایشگاهی

## ۲-۱- دستگاه آزمایشگاهی

مطابق شکل ۱، دستگاه آزمایشگاهی به گونه‌ای طراحی شده که ضریب انتقال حرارت در فضای حلقوی یا Annular اندازه‌گیری می‌شود. به‌همین منظور، یک استوانه از جنس فولاد ضد زنگ به طول ۴۰ سانتی‌متر و قطر ۲ سانتی‌متر درون یک ظرف شیشه‌ای پیرکس (مقاوم در برابر حرارت مستقیم بیش از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) به طور عمودی قرار گرفته. در پیرامون این استوانه ۱ عدد ترموکوپل نوع (PT100) به طول ۱۵ سانتی‌متر و قطر ۲

جداگانه کالیبره شده است استفاده می‌گردد. هم‌چنین اتصالات مورد نظر همگی استاندارد بوده و افت فشار ناچیز برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین برای کنترل گرم‌کن مرکزی از یک اتوترانس صفر تا ۳۰۰ ولت مطابق شکل ۱ استفاده شده و میزان شار حرارتی از طریق اتوترانس کنترل می‌شود.

میلی‌متر که امکان اندازه‌گیری K است محدوده دمایی ۰ تا ۷۰۰ درجه کلوین را دارند، نصب گردیده است. در مرکز استوانه یک گرم‌کن حرارتی به طول ۱۵ سانتی‌متر و قطر ۱۳ میلی‌متر قرار دارد که تا شار حرارتی حدود ۱۳۲ kW.SqrM را تامین می‌نماید. هم‌چنین برای کنترل دبی ورودی به فضای حلقوی از یک شیر پروانه‌ای که قبلا



شکل ۱: نمای کلی دستگاه آزمایشگاهی

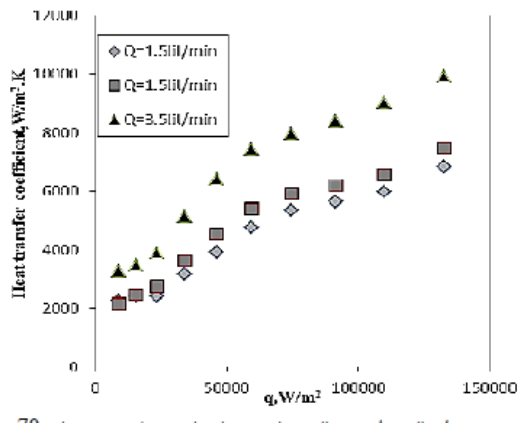
به‌میزان، ۲۰۷ افزایش می‌یابد پس از آن فرصت داده می‌شود تا دماهای اطراف استوانه و دمای ورودی و خروجی پایدار گردد که معمولاً زمان پایداری بین ۲ الی ۵ دقیقه خواهد بود بعد از ثبت دماها و خواندن جریان از طریق مالتی‌تره‌مین روند با افزایش ولتاژ به میزان ۲۰۷ ادامه می‌یابد. به‌دلیل خاصیت انفجاری بخارات حاصل شده در این آزمایش ما برای کم کردن خطر احتمالی از یک سرد کننده یا کندانسور که از جنس استیل می‌باشد استفاده کردیم که منبع ورودی آن از شیر شهری استفاده شده و خروجی آن به فاضلاب شهری متصل است به همین خاطر از یک رتامتر برای کنترل ورودی آب به سرد کن تعبیه شده است که ما دبی را روی ۲/۵ lit/min تنظیم می‌کنیم این مراحل برای دمای ۸۰C تکرار می‌شود.

## ۲-۲- نحوه انجام آزمایش

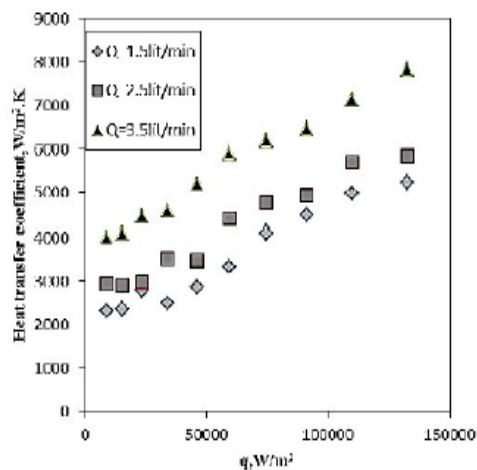
پس از شستن دستگاه با آب باید دقت نمود که آب کاملاً تخلیه گردد زیرا آب در آمیل هیدرید بسیار نامحلول است. برای اضافه کردن آمیل هیدرید به‌دلیل بخارات زیاد و سمی بودن آن‌ها توصیه می‌شود حتماً از ماسک، عینک و دستکش استفاده شود. مقدار مورد نیاز حدود ۱۲ lit می‌باشد ولی به‌دلیل فراریت بالای آن در طول مراحل آزمایش آمیل هیدرید به مخزن اضافه می‌شود تا سطح مورد نظر حفظ گردد. به‌دلیل خاصیت آتش‌گیر بسیار سریع این ماده که نباید در مجاورت مستقیم شعله آتش قرار گیرد باید حرارت به‌صورت غیر مستقیم به آن وارد شود دمای مخزن روی دمای روی عدد ۷۰ تثبیت می‌گردد. پس از رسیدن دمای مخزن به دمای خواسته شده، توسط درجه تنظیم ولتاژ که بر روی اتوترانس قرار دارد ولتاژ

$$\alpha = \frac{\dot{m}.c.(T_{outlet} - T_{inlet})}{(T_s - T_b)_{ave.}}$$

وضعیت تغییرات ضریب انتقال حرارت را با شار حرارتی دبی‌های مختلف و در دو دمای سیال متفاوت را نشان می‌دهد.



شکل ۳: بررسی ضریب انتقال حرارت آمیل هیدرید در شارهای مختلف و در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد



شکل ۴: بررسی ضریب انتقال حرارت آمیل هیدرید در شارهای مختلف و در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد

### ۳-۲- اثر دمای سیال ورودی سیال

همان‌طور که در شکل (۱) و (۲) مشاهده می‌شود، با تغییر دمای ورودی افزایش بسیار اندکی در ضرایب انتقال حرارت مشاهده می‌شود. درحالی‌که بیش‌ترین تاثیر تغییر دمای ورودی را می‌توان در جابه‌جا شدن نقطه آغازین فرآیند حباب‌زایی مشاهده نمود. چنان‌چه در شکل (۱) مشاهده می‌شود. در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، حباب‌زایی حول شارحرارتی ۷۰ kW.Sqr.M آغاز

در این رابطه  $m$  دبی جرمی جریان ورودی به فضای حلقوی،  $T_s$  دمای سطح استوانه که توسط یک ترموکوپل که قبلاً تعیبه شده بود، می‌باشد  $T_{inlet}$  و  $T_{outlet}$  به ترتیب دمای ترموکوپل‌های ورودی و خروجی انولوس می‌باشند  $T_b$  نیز میانگین دمای ورودی و خروجی انولوس می‌باشد. باید توجه داشت که سایر خواص فیزیکی از قبیل ظرفیت گرمایی ویژه، ویسکوزیته و هدایت گرمایی سیال در دمای فیلم سیال یعنی میانگین حسابی دمای ورودی و خروجی انولوس محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه ترموکوپل‌ها دقیقاً روی سطح قرار ندارند برای اصلاح دمای سطح از رابطه (۲) استفاده می‌گردد به این صورت که:

$$T_s - T_b = (T_{th} - T_b) - (s/k) / (q/A) \quad (2)$$

توجه شود که  $s$  نیز فاصله محل قرارگیری ترموکوپل تا سطح استوانه می‌باشد.  $T_{th}$  نیز دمای اندازه‌گیری شده توسط هر ترموکوپل است. بررسی آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سه عامل مهم یعنی شار حرارتی، دبی جریان عبوری از فضای حلقوی و دمای ورودی سیال بر ضریب انتقال حرارت موثر هستند. به همین منظور هر یک از این عوامل در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳- بررسی اثر پارامترهای مختلف

#### ۳-۱- اثر شار حرارتی

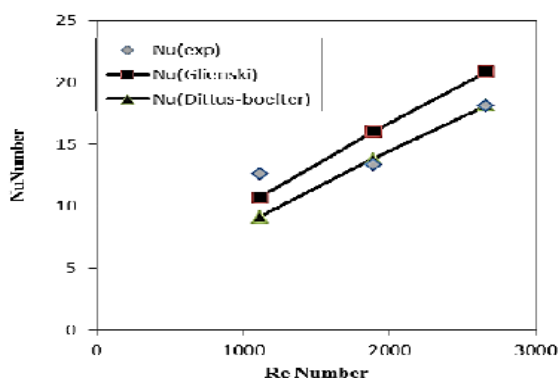
نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که صرف نظر از هر دمای ورودی و شدت جریان خاص، ضریب انتقال حرارت به شدت تابعی از شار حرارتی می‌باشد. در واقع با زیاد شدن شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. هم‌چنین از یک شار خاص بسته به دمای توده سیال، مکانیسم انتقال حرارت از جابه‌جایی اجباری به دلیل تشکیل حباب و فرآیند حباب‌زایی مربوط به جوشش، به ترکیبی از جوشش و جابه‌جایی اجباری تغییر پیدا کرده و نرخ افزایش ضریب انتقال حرارت در این حالت بیش‌تر می‌شود. شکل (۳) و (۴)،

جریانی مقایسه شده‌اند. اگرچه این معادلات برای محلول‌ها و مخلوط‌ها و حتی هیدروکربن‌های سردساز اصلاح شده‌اند ولی مطالعه پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهد که این معادلات برای نرمال هپتان نیز جواب‌های قابل قبولی تا محدوده خطای ۸٪-۱۶٪ به دست می‌دهند. نتایج مقایسه بین مدل‌های موجود تجربی و داده‌های به دست آمده نشان می‌دهد که این داده‌ها نسبتاً دقیق بوده و قابل استناد می‌باشند. هم‌چنین بررسی دقیق نتایج نشان می‌دهد که برای بررسی پدیده انتقال حرارت در فضای حلقوی، مدل چن به دلیل در بر گرفتن هر دو مکانیسم انتقال حرارت جوششی-اجباری (هم‌پوشانی بهتری از داده‌های آزمایشگاهی را ارائه می‌نماید).

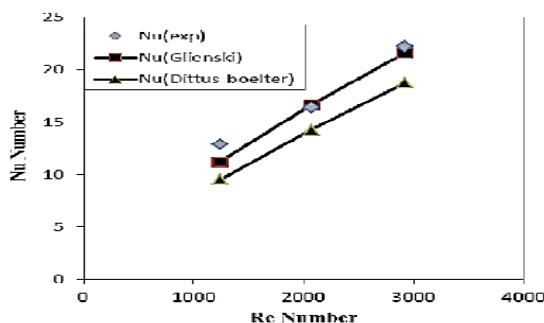
می‌گردد. درحالی‌که حباب‌زایی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد زودتر و در شار حدود با ۵۰ kW.Sqr.M آغاز می‌شود در واقع زیاد کردن دما و کاهش میزان Subcooled حباب‌زایی زودتر و فرآیند آن شدیدتر خواهد شد.

#### ۴-مقایسه نتایج حاصل از آزمایش با مدل‌های موجود تجربی

به منظور اطمینان از صحت داده‌های به دست آمده در این آزمایش‌ها، داده‌های حاصل با مدل‌های شناخته شده و نسبتاً دقیق گلینسکی و دیتوس-بولتر برای قسمت جابه‌جایی اجباری و با مدل چن برای قسمت جوشش

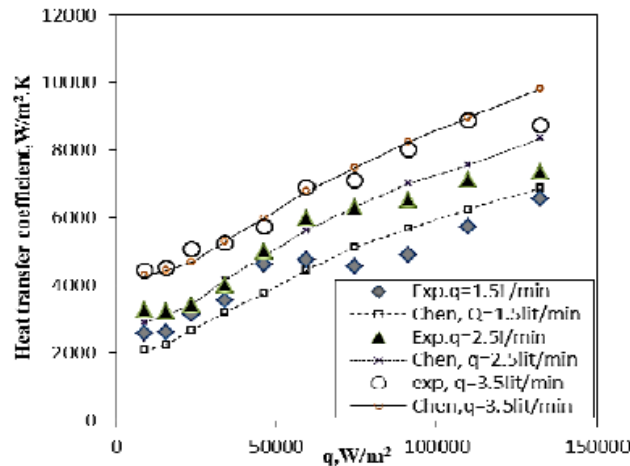


شکل ۷: با مقایسه داده‌های آمیل هیدرید در دمای ۷۰°C و شار ۸۷۰۰ W/m با مدل‌های تجربی گلینسکی و دیتوس بولتر



شکل ۸: مقایسه داده‌های آمیل هیدرید در دمای ۸۰°C و شار ۸۷۰۰ W/m با مدل‌های تجربی گلینسکی و دیتوس بولتر

با توجه به این که فرآیند آزمایشگاهی فوق شامل دو ناحیه انتقال حرارتی می‌باشد، به همین دلیل برای بررسی صحت داده‌های به دست آمده از مدل ترکیبی چن [۲] استفاده گردیده و نتایج تئوریک حاصل از این مدل با داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نیز نشان می‌دهد که داده‌ها از انطباق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار هستند.



شکل ۹: نمودار مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با مدل ترکیبی چن برای آمیل هیدرید خالص در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد

بررسی کلی بر روی وضعیت حباب‌های تشکیل‌شونده در ناحیه جوشش نشان می‌دهد که با افزایش شار حرارتی مطابق انتظار، فرآیند حباب‌زایی شدت یافته و حباب‌های بزرگ‌تر و زیادتری به وجود می‌آیند. ولی با افزایش دبی جریان، به دلیل کاهش زمان لازم برای تشکیل و رشد قطر حباب و جدا شدن سریع‌تر حباب‌ها از سطح، اندازه حباب‌ها کوچک‌تر می‌گردد. نتایج به دست آمده از مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های گلینسکی، دیتوس بویلر و چن نشان دادند که این داده‌ها انطباق قابل قبولی با این سه مدل مخصوصاً مدل چن در حالت جوشش جریان‌ی- هسته‌زایی دارند.

## منابع

- [1] R. J Simoneau, F. F Simon A visual study of velocity and buoyancy effects on boiling nitrogen, Nasa , Tnd3354, (1966)
- [2] L. T. Chen, W. C. Chuno The effect of orientation on R 11 bubble frequencies in nucleate pool boiling. Letters Heat Mass Transfer, 6,(1979),429-438.
- [3] H. Mueller-Steinhausen, A.P. Watkinson, N. Epstein, , Subcooled- boiling and convective heat transfer to heptanes flowing inside an annulus and past a coiled wire, part I, experimental results, ASME, J. , Heat Transfer, 108, (1986) , 922-927.
- [4] J.F. Klausner, R. Mei, D.M. Bernhard, L.Z. Zeng, Vapor bubble departure in forced convection boiling, Int. , J. , Heat Mass Transfer, 36, (1993) , 651-662.

## ۵- نتیجه‌گیری

آمیل هیدرید به عنوان یک ماده سردساز با  $h_{fg}$  بالا و سمیت و فراریت زیاد به عنوان یک ماده مورد بررسی قرار گرفته و هدف محاسبه ضریب انتقال حرارت جوششی- جریانی این ماده می‌باشد که در طراحی مبدل‌ها و بویلرها و کلیه سیستم‌های حرارتی کاربرد دارد زیرا برداشت دقیق از مقدار ضریب انتقال حرارت باعث طراحی بهینه و اقتصادی صنایع حرارتی می‌شود. هم‌چنین اثر پارامترهای مختلفی هم‌چون شار حرارتی یکنواخت، دبی جریان، دمای مخزن و عمودی بودن فضای حلقوی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج اولیه این بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش شار حرارتی به دلیل تاثیر انکارناپذیر آن بر روی تولید حباب ضرایب انتقال حرارت به شدت افزایش می‌یابد برای یکنواخت بودن شار، سیستم استوانه‌ای و هیتر استوانه‌ای به دلیل وجود پارامتر  $T_{in}$  (دمای مخزن) پیچیدگی خاصی در مورد این پارامتر و اثر آن ملاحظه گردید. بنابراین با مطالعه بیش‌تر این نتیجه ثابت شد که اثر مفید این پارامتر بر روی نقطه آغازین جوشش می‌باشد بدین صورت جوشش هسته‌ای سریع‌تر اتفاق می‌افتد. از لحاظ فیزیکی چون حباب‌ها سریع‌تر از سطح جدا می‌شوند لذا حرارت سطح را با خود منتقل و  $T_s - T_b$  مقدار کم‌تر و در نتیجه آن ضریب انتقال حرارت بیش‌تری مشاهده می‌گردد. هم‌چنین یک

[6] F.C. Hsieh, K.W. Li, Y.M. Lie, C.A. Chen, T.F. Lin, Saturated flow boiling heat transfer of R-407C and associated bubble characteristics in a narrow annular duct, Int. J. Heat Mass Transfer, 51, (2008), 3763–3775.

[5] G.E. Thorncroft, J.F. Klausner, The influence of vapor bubble sliding on forced convection boiling heat transfer, ASME, J. Heat Transfer, 121, (1999), 73–79.