

## به دست آوردن ضریب انتقال حرارت اطراف میله سوخت توسط یک لوپ تحت فشار ۲۰ بار

## منصور طالبی

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و شتاب دهنده‌ها

## چکیده

بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت جابه‌جایی در مجرای بین دو استوانه هم مرکز با وجود شار کسینوسی بر استوانه داخلی، در محدوده اعداد رینولدز بین ۱۰۰ تا ۱۴۵۰ انجام گردیده است. به منظور تولید شار کسینوسی الممتی بر روی تیوب قرار گرفته در استوانه داخلی، با طول گام‌های متفاوت پیچیده شده است. دمای سطح با استفاده از ترموکوپل-های نوع k اندازه‌گیری شده و عدد ناسلت جریان محاسبه گردیده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری نشان می‌دهند که: مکان پیشینه دمای سطح بالا تر از وسط لوله-که متناظر با بیشترین شار تولیدی است- اتفاق می‌افتد، همچنین با افزایش عدد رینولدز جریان، مقدار پیشینه دمای سطح به میانگین دمای سطح نزدیک‌تر می‌گردد. علاوه بر این با مقایسه نتایج حاصل با تحقیقات پیشین نشان داده شده است که با وجود تفاوت در شرایط مرزی اعداد ناسلت به دست آمده متشابه می‌باشند.

کلید واژه : لوپ تحت فشار، میله سوخت، ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی، شار حرارتی غیر یکنواخت

## مقدمه

انتقال حرارت در مجرای بین استوانه‌های هم مرکز دارای کاربردهای مختلفی در صنعت می‌باشد که به عنوان نمونه می‌توان به مبدل‌های حرارتی، خنک کاری راکتورهای اتمی، توربین‌های گازی و غیره اشاره کرد. بررسی مطالعات گذشته در ارتباط با انتقال حرارت در مجرای بیت دو استوانه هم مرکز نشان می‌دهد که تحقیقات گسترده‌ای در ارتباط با این مسئله با شرایط مرزی متفاوت انجام گرفته است. مبدل حرارتی که جریان اولیه از استوانه داخلی عبور می‌کند و جریان ثانویه با عبور از مجرای بین دو استوانه خنک می‌گردد یکی از پرکاربردترین نمونه‌ها می‌باشد که از حدود یک قرن پیش و توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی بسیاری از این مطالعات به دست آوردن عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه-جایی و ارائه رابطه‌ای برای نحوه تغییرات آن با پارامترهای مختلف جریان مخصوصاً عدد رینولدز جریان می‌باشد. در مراجع [۱] و [۲] خلاصه جامعی از روابط ارائه شده توسط محققان پیشین جمع آوری شده است. همچنین به عنوان تحقیقات جدیدتر می‌توان به کار آقایان Lu و Wang (مراجع [۳] و [۴]) اشاره نمود که اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز بین ۱۰ تا ۳۰۰۰۰ را برای هندسه‌ای مشابه با مبدل حرارتی واقعی برای به دست آوردن مشخصه‌های انتقال حرارت جابه‌جایی برای جریان آب در

سه راستای مختلف به سمت بالا، به سمت پایین و در جهت افقی انجام گرفته است. نتایج حاصل از کار آن-ها بیانگر این است که تبدیل جریان از آرام به متلاطم در مجرای بین دو استوانه در اعداد رینولدز بسیار پایین تر در مقایسه با جریان داخل لوله اتفاق می افتد. آقایان Sung و Chung (مرجع [۵]) حل عددی مستقیم جریان با انتقال حرارت بین دو استوانه را برای جریان متلاطم انجام داده اند. نتایج حل عددی آن-ها بیانگر این است که ساختارهای متلاطم حرارتی نزدیک دیوار بیرونی در مقایسه با ساختارهای نزدیک دیواره لوله داخلی فعال تر می باشند که دلیل آن به مکانیزم های مختلف تشکیل گردابه ها<sup>۱</sup> در روی دیوارهای درونی و بیرونی مربوط می گردد. همچنین Churchill و همکاران (مرجع [۶]) مقادیر عدد ناسلت مربوط به جریان بین دو استوانه را برای شرایط مرزی متفاوت از جمله شار ثابت بر روی لوله بیرونی، شار ثابت بر روی میله داخلی و شار ثابت بر روی هر دو لوله با استفاده از نتایج حل عددی محاسبه کرده اند. در بیشتر تحقیقات گذشته روابط ارائه شده برای عدد ناسلت وابسته به مقادیر نسبت قطر لوله بیرونی به داخلی، عدد رینولدز و عدد پراتل می باشد با توجه به اینکه شرط شار ثابت و دمای سطح ثابت تا اندازه زیادی معادلات را ساده می کند و همچنین به دلیل اینکه شرط شار ثابت یک حد بالا برای ضریب انتقال حرارت جابه جایی و شرط دما ثابت حد پایین برای آن محسوب می گردد، بسیاری از تحقیقات گذشته یکی از این دو شرط را در نظر گرفته اند، اگر چه در عمل هیچ یک از این شرایط در عمل به طور کامل محقق نمی شود. هدف از تحقیق پیش رو محاسبه ضریب انتقال حرارت در مجرای بین دو استوانه با وجود شار کسینوسی بر روی میله داخلی می باشد. شار حرارتی کسینوسی مخصوصاً برای انتقال حرارت از روی میله های سوخت در راکتورهای هسته ای کاربرد دارد (مرجع [۷]).

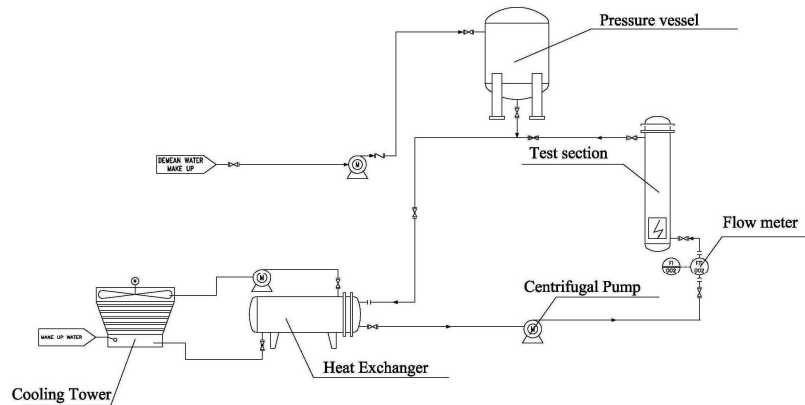
### نحوه انجام آزمایش و وسایل آزمایش

شماتیک کل لوپ در شکل ۱ آورده شده است. لوپ در حالت کلی به منظور شبیه سازی لوپ اول نیروگاه-های PWR<sup>۲</sup> طراحی گردیده است. آب سیال کاری لوپ می باشد. لوپ دارای دو قسمت مجزا می باشد. جریان اصلی مربوط به سیال عبوری از ناحیه آزمایش بوده و قسمت دوم لوپ مربوط به جریان ثانویه عبوری از مبدل و برج خنک کن می باشد. در قسمت اول یک سیکل کاملاً بسته داریم، جریان سیال خنک خروجی از مبدل وارد پمپ شده و پس از آن با عبور از شیرهای نشان داده شده، وارد ناحیه آزمایش شده و گرم می-گردد. جریان خروجی از ناحیه آزمایش پس از طی مسیر وارد مبدل شده و با از دست دادن حرارت خود به سیال ثانویه در مبدل خنک شده و دوباره همین سیکل طی می گردد. افزایش فشار در لوپ توسط کپسول ازت متصل به مخزن فشار انجام می گردد. کنترل فشار مخزن توسط شیرهای سولونوییدی قرار گرفته شده در

<sup>1</sup> vortex regeneration processes

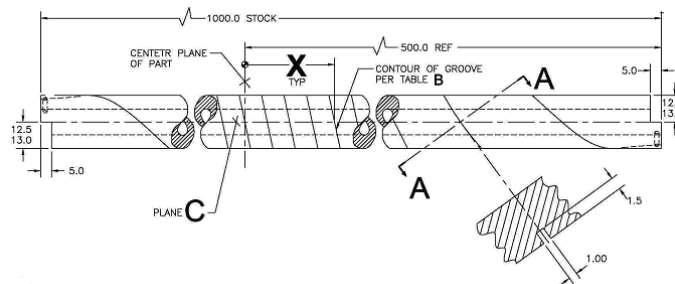
<sup>2</sup> Pressurized Water Reactor

بالای مخزن انجام می گیرد. به منظور تامین شرایط برای انجام آزمایشات با دبی های مختلف موتور قرار گرفته شده در سیکل اصلی از نوع دور متغیر می باشد. مبدل قرار گرفته در لوپ از نوع پوسته و لوله می باشد که آب خروجی از آن وارد برج خنک کن شده و سرد می گردد.



شکل ۱: شماتیک لوپ تحت فشار مرکز اصفهان

هر دو لوله های داخلی و بیرونی از جنس فولاد ضد زنگ (ASTM-A-312) به ترتیب با قطر خارجی لوله بیرونی و داخلی ۶۰.۳ میلیمتر و ۳۳.۴ میلیمتر و قطر داخلی لوله بیرونی و داخلی ۵۴.۷۶ و ۲۷.۹۲ میلیمتر می باشند. طول محفظه آزمایش برابر ۱۶۰۰ میلیمتر می باشد. به منظور تولید شار در میله داخلی از المنت از جنس CrAl 305 با مقاومت الکتریکی ۵.۰۵ اهم بر متر استفاده شده است. طول المنت برابر ۴۳۰۰ میلیمتر بوده و قطر آن ۰.۶ میلیمتر می باشد که بر روی تیوب به قطر ۲۵ میلیمتر و طول ۱۰۰۰ میلیمتر از جنس CERAMIC پیچیده شده است، بنابر این محفظه آزمایش دارای طول ورودی و خروجی برابر ۳۰۰ میلیمتر می باشد. به منظور تولید شار کسینوسی طول گام هر دور متفاوت می باشد. نحوه پیچیده شدن المنت بر روی میله در شکل ۲ نشان داده شده است. قطر هیدرولیکی ( $D_h$ ) مجرای بین دو استوانه برابر ۲۱.۳۶ میلیمتر بوده و در نتیجه طول ورودی بیشتر از ۱۰ برابر قطر هیدرولیکی می باشد.



شکل ۲: نحوه تولید شار کسینوسی در میله به کمک سیم المنت

اندازه گیری دما با استفاده از ترموکوپل های نوع k که بر روی دیواره بیرونی قرار داده شده اند انجام می گیرد. دو ردیف ترموکوپل بر روی محفظه آزمایش قرار داده شده اند. قطر ترموکوپل ها کوچک انتخاب شده تا تاثیر زیادی بر جریان سیال نگذارد. به منظور کاهش انتقال حرارت به محیط تمام طول محفظه آزمایش عایق بندی شده است.

### تحلیل داده ها

حجم کنترل به اندازه dz را در ارتفاع Z در نظر می گیریم با توجه به قانون اول ترمودینامیک مقدار حرارت وارد شده به حجم کنترل (با فرض عدم تغییر فاز) صرف افزایش دمای سیال می گردد، بنابر این داریم:

$$\dot{q}' A_s dz = \dot{m} c_p dT_f \quad (1)$$

با انتگرال گیری از  $Z=-H/2$  تا  $Z=H/2$  داریم:

$$\dot{m} c_p \int_{T_{f,i}}^{T_f} dT_f = \int_{-H/2}^z \dot{q}' A_s dz \quad (2)$$

تغییرات شار در طول لوله برابر است با:

$$\dot{q}' = \dot{q}''_c \cos \frac{\pi z}{H_e} \quad (3)$$

که در آن  $H_e$  طولی است که در آن شار حرارتی داریم و  $Z=0$  متناظر با وسط لوله می باشد. با ترکیب معادله ۳ با معادله ۲ و انتگرال گیری داریم:

$$T_f = \frac{\dot{q}''_c A_s H_e}{\pi c_p \dot{m}} \left( \sin \frac{\pi z}{H_e} + \sin \frac{\pi H}{2H_e} \right) + T_{f,i} \quad (4)$$

که در رابطه فوق  $A_s$  سطحی است که از آن انتقال حرارت صورت می گیرد که برابر با سطح خارجی لوله داخلی می باشد و برابر است با:

$$A_s = \pi d_o \quad (5)$$

از طرف دیگر انتقال حرارت بین سطح لوله داخلی و سیال خنک کننده برابر است با:

$$\dot{q}' A_s dz = h A_s dz (T_s - T_f) \quad (6)$$

در نتیجه پس از اندازه گیری دمای سطح و به دست آوردن دمای میانگین سیال ضریب انتقال حرارت برابر است با:

$$h = \frac{\dot{q}'}{(T_s - T_f)} \quad (7)$$

پس از به دست آوردن ضریب انتقال حرارت جابه جایی عدد ناسلت موضعی و کلی و ضریب انتقال حرارت کلی با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه می باشند:

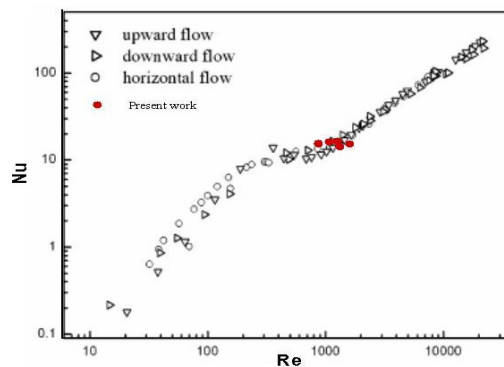
$$\bar{h} = \frac{1}{H_e} \int_{-H_e/2}^{H_e/2} h(z) dz$$

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (8)$$

$$\overline{Nu} = \frac{1}{H_e} \int_{-H_e/2}^{H_e/2} Nu(z) dz$$

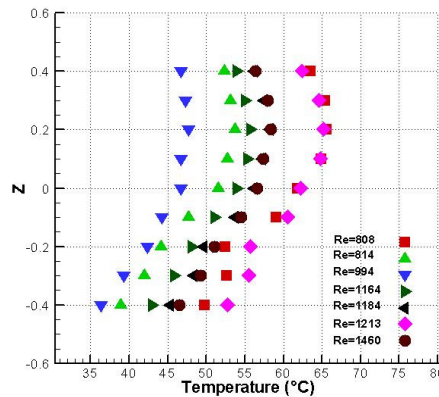
## نتایج

آزمایش در اعداد رینولدز مختلف (بر اساس قطر هیدرولیکی) از ۸۰۰ تا ۱۴۵۰ انجام گرفته است. در شکل ۳ تغییرات عدد ناسلت با کار پیشین آقای Wang (مراجع ۲ و ۳) مقایسه شده است. خواص سیال در دمای متوسط سیال، محاسبه شده توسط فرمول ۴، در نظر گرفته شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود با وجود آنکه شرایط مرزی کاملاً متفاوت می‌باشند اعداد ناسلت قابل مقایسه می‌باشند که این مطلب به دلیل آن است که جریان ناحیه آرام را پشت سر گذاشته و در ناحیه آرام وابستگی به شرایط مرزی شدید می‌باشد.



شکل ۳: نحوه تغییرات عدد ناسلت با عدد رینولدز

شکل ۴ نشان دهنده نحوه تغییرات دمای سطح برای رینولدزهای متفاوت می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌گردد بیشینه دمای سطح بالاتر از وسط لوله که متناظر با بیشینه مقدار شار حرارتی است، اتفاق می‌افتد. مقدار و محل بیشینه دما به منظور جلوگیری از تبخیر سطحی حائز اهمیت می‌باشد. با افزایش عدد رینولدز اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز مقدار بیشینه دما به دمای متوسط نزدیک‌تر می‌گردد.



شکل ۴: نحوه تغییرات دمای سطح

### بحث و نتیجه گیری

اندازه گیری آزمایشگاهی دمای سطح برای جریان بین دو استوانه هم مرکز با شار کسینوسی در روی لوله داخلی برای محدوده رینولدز بین ۸۰۰ تا ۱۴۵۰ توسط ترموکوپل های نوع k انجام گرفته است. نتایج به دست آمده بیانگر این است که بیشینه دما در بالاتر از وسط لوله که متناظر با بیشینه مقدار شار حرارتی است رخ می دهد. همچنین با افزایش عدد رینولدز جریان مقدار بیشینه دما به مقدار میانگین دمای سطح نزدیک تر می گردد. مقایسه نتایج این تحقیق با کارهای پیشین نشان می دهد که با وجود تغییر در شرایط مرزی اعداد ناسلت به دست آمده مشابه به هم می باشند.

### مراجع

- [1] E.Y.W. Leung, Heat transfer with turbulent flow in concentric and eccentric annuli with constant and variable heat flux, Ph.D. Thesis, Stanford University, Palo Alto, CA, 1962.
- [2] Drikor, J., Meyer, J. P., 2002. "Heat Transfer Coefficient in Concentric Annuli". *ASME*, Vol. 124, December, pp.1200-1202.
- [3] Guangyao, L., Wang J., 2008. "Experimental investigation on heat transfer characteristics of water flow in a narrow annulus". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 8-13
- [4] Guangyao, L., Wang J., 2008. "Experimental investigation on flow characteristics in a narrow annulus". *Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 495-499
- [5] Chung, S. Y., Sung, H. J., 2003. "Direct numerical simulation of turbulent concentric annular pipe flow". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 24, pp. 399-411.
- [6] Churchill, S. w., Yu, B., Kawaguchi, Y., Ozoe, H., 2005. "The computed characteristics of turbulent flow and convection in concentric circular annuli". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 635-646.
- [7] El-Wakil, M. M., 1971. *Nuclear Heat Transport*. International textbook company, New York, USA