

بررسی و تحلیل مبدل حرارتی به کمک نانو سیال ها به منظور افزایش راندمان حرارتی

علی احمدی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب؛ aliahmadi.mech@gmail.com

علی رجب پور، استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) قزوین؛ a.rajabpour@gmail.com

چکیده

مبدل های حرارتی تقریباً از تجهیزات عمومی مورد استفاده در فرآیند گرمایش صنعتی می باشند. گرما به وسیله ی جابجایی و هدایت حرارتی از طریق دیواره های مبدل از یک سیال به سیالات دیگر انتقال می یابد. بازدهی مبدل حرارتی وابسته به ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال عامل می باشد. ضریب انتقال حرارت جابجایی آب و نانو سیال های مس-آب، آلومینیوم-آب، آلومینیوم اکسید-آب و تیتانیم اکسید-آب با کسر حجمی ۲ درصد برای یک مبدل حرارتی با جریان متضاد محاسبه شده اند. نتایج نشان می دهد که ضریب انتقال حرارت جابجایی این نانو سیال ها به ترتیب ۸۱٪، ۶۳٪، ۶۶٪، ۶۴٪ درصد بیشتر از آب خالص و ضریب انتقال حرارت کلی مبدل به ترتیب ۲۳٪، ۲۰٪، ۲۱٪، ۲۰٪ درصد بیشتر از ضریب انتقال حرارت مبدل زمان استفاده از آب است.

کلمات کلیدی: مبدل حرارتی، بازدهی، نانو سیال، هدایت حرارتی

مقدمه

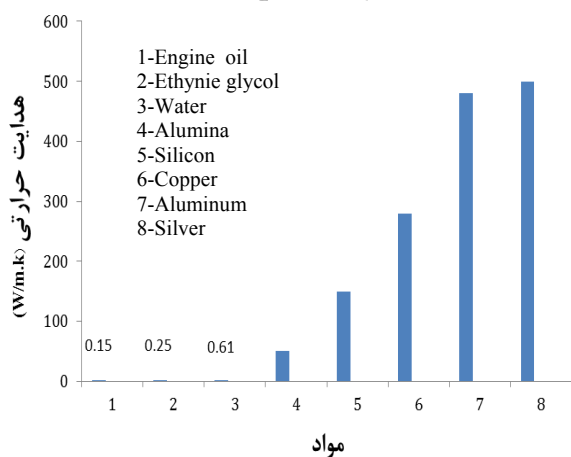
صرفه جویی در مصرف انرژی یکی از اهداف اصلی اقتصاد جهانی است که در آینده به مهمترین هدف آن تبدیل خواهد شد. یکی از راه های سودمند در کاهش تقاضا برای انرژی استفاده بهینه از انرژی است. مبدل های حرارتی جهت انتقال انرژی گرمایی بین چند ماده مورد استفاده قرار می گیرند و در صنایع مختلف از جمله نیروگاه های برق، پالایشگاه ها، صنایع پتروشیمی، صنایع غذایی و دارویی، صنایع ذوب فلز، سرمایش ساختمانها و... بصورت گسترده به کار می روند [۱،۲].

در مبدل های حرارتی انتخاب سیال عامل یکی از مهمترین فاکتورها در میزان بازدهی مبدل است. در یک دمای محیطی ضریب هدایت حرارتی مواد جامد فلزی بسیار بیشتر از سیال ها می باشد (برای مثال ضریب هدایت حرارتی مس ۷۰۰ و ۳۰۰۰ برابر ضریب هدایت حرارتی آب و روغن موتور می باشد) که در شکل ۱ نشان داده شده است.

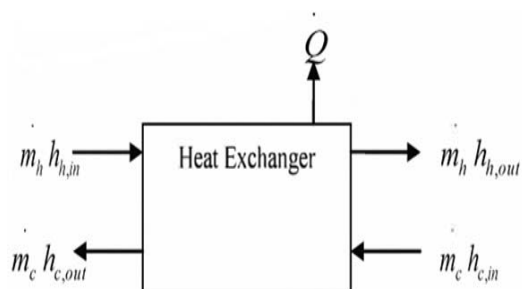
ضریب انتقال حرارت نانو سیال ها بسیار بهتر از سیال پایه می باشد به علاوه اینکه افت فشار نیز در نانو سیالات وجود ندارد یا بسیار ناچیز می باشد. مهمترین دلایل بهبود انتقال حرارت در نانو سیالات: نانو ذرات معلق هدایت حرارتی سیال را افزایش می دهند، حرکت های بسیار زیاد نانو ذرات باعث افزایش آشفته‌گی سیال و در نتیجه افزایش تبادل حرارتی می شود [۴]. بازدهی حرارتی مبدل ها به ضریب انتقال حرارت هدایت و جابجایی سیال عامل آن وابسته می باشد. ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال هم به هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی، ویسکوزیته و چگالی آن وابسته است [۵]. جدول ۱ خواص ترموفیزیکی آب و برخی از نانو سیال ها را نشان می دهد.

جدول ۱: مشخصات حرارتی آب و نانو سیال ها در دمای ۳۴۳ کلوین [۶]

Fluids	K(w/m.k)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$\mu \times 10^4 (\text{kg/m.s})$	$c_p (\text{KJ/kg.K})$
Water	0.663	977.5	4.040	4.190
Cu-water	0.749	1136.7	4.271	4.111
Al-water	0.749	1012.3	4.271	4.121
Al ₂ O ₃ -water	0.744	1037.4	4.271	4.119
Ti ₂ O-water	0.730	1034.9	4.271	4.117



عملکرد مبدل های حرارتی تبادل حرارت بین دو سیال در حال حرکت می باشد بدون اینکه این دو سیال با هم مخلوط شوند. سیال داغ گرما را به سیال سرد می دهد و انرژی جنبشی و پتانسیل قابل چشم پوشی است [۱۳]. موازنه انرژی مبدل حرارتی در شکل ۲ انجام شده است.



شکل ۲: دیاگرام موازنه انرژی مبدل حرارتی

در مبدل های حرارتی دو سیال به دلیل اینکه به وسیله ی دیواره ها از هم جدا شده اند با هم مخلوط نمی شوند و همچنین دبی سیال گرم و سرد باید ثابت باشد. معادله موازنه انرژی مطابق با رابطه زیر بیان می شود [۱۴]:

$$\dot{X}_{in} - \dot{X}_{out} - \dot{X}_{destroyed} = \Delta \dot{X}_{sys} = 0 \rightarrow \text{steady} \quad (6)$$

(۷)

$$(\dot{m}_h h_{h,in} + \dot{m}_c h_{c,in}) - (\dot{m}_h h_{h,out} + \dot{m}_c h_{c,out}) - Q = 0$$

(۸)

$$(\dot{m})_c (h_{c,out} - h_{c,in}) + Q = (\dot{m})_h (h_{h,in} - h_{h,out})$$

در نتیجه بازده مبدل به شکل زیر در خواهد آمد:

$$\epsilon = \frac{\dot{m}(h_{out} - h_{in})}{\dot{m}_{min}(h_{h,out} - h_{c,in})} \quad (9)$$

با استفاده از رابطه دیتوس-بولتر^۲ در مبدل های حرارتی می توان عدد نوسلت را محاسبه کرد [۱۵-۱۸].

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (10)$$

چگالی نانو سیال مطابق با رابطه زیر محاسبه خواهد شد [۱۹،۲۰].

$$\rho_f = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (11)$$

ظرفیت گرمایی ویژه نانو سیال نیز به وسیله رابطه زیر تخمین زده می شود [۱۹،۲۰].

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p \quad (12)$$

شکل ۱: هدایت حرارتی مواد جامد و مایع در ۳۰۰ کلوین [۳]

تیروماریمورگان^۱ و همکارانش [۷] تحقیقاتی بر روی بازده مبدل های حرارتی در نرخ دبی جرمی های متفاوت سیال سرد در یک مبدل حرارتی انجام داده اند. که نتایج نشان می دهد که بازده مبدل با تغییر دبی جرمی سیال سرد از ۱۱۸،۸ kg/h تا ۶۵۶،۹ kg/h و ثابت نگه داشتن دبی جرمی سیال گرم در ۵۱،۲ kg/h از ۷۴،۸٪ تا ۸۷،۶٪ افزایش می یابد. و همچنین با تغییر دبی جرمی سیال سرد از ۱۲۰،۲ kg/h تا ۶۶۴،۱ kg/h و ثابت نگه داشتن دبی جرمی سیال گرم در ۹۷،۶ kg/h مبدل از ۵۳،۰٪ تا ۷۴،۱٪ افزایش می یابد. این مقاله بر استفاده از نانو سیال ها جهت بهبود راندمان حرارتی مبدل های حرارتی تاکید دارد.

تحلیل مبدل حرارتی به کمک نانو سیال

در این بخش در مورد روابط و معادلات مهم جهت بدست آوردن بازدهی مبدل های حرارتی بحث خواهد شد [۲،۸].

$$\epsilon = \frac{\text{انتقال حرارت واقعی}}{\text{حداکثر انتقال حرارت ممکن}} \quad (1)$$

فرض کنید که نرخ انتقال حرارت تابعی از دبی جرمی سیال و اختلاف دمای ورودی و خروجی باشد. آنگاه این تابع مانند رابطه ی زیر نوشته می شود.

$$Q = f(\dot{m}, T) \quad (2)$$

نرخ انتقال حرارت از سیال گرم به سیال سرد از رابطه ی زیر محاسبه می شود.

$$Q_h = \dot{m}_h c_{ph} (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (3)$$

و نرخ حرارت دریافتی توسط سیال سرد برابر است با:

$$Q_c = \dot{m}_c c_{pc} (T_{c,in} - T_{c,out}) \quad (4)$$

در مبدل حرارتی بیشترین تبادل حرارتی زمانی اتفاق می افتد که دمای سیال در یک نرخ جریان جرمی ثابت برابر با $T_{h,in} = T_{c,out}$ یا $T_{c,in} = T_{h,out}$ باشد.

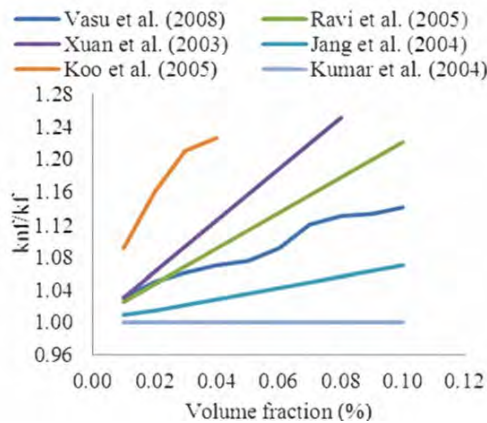
بیشترین ظرفیت نرخ انتقال حرارت (Q_{max}) را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$Q_{max} = (\dot{m} c_p)_{min} (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (5)$$

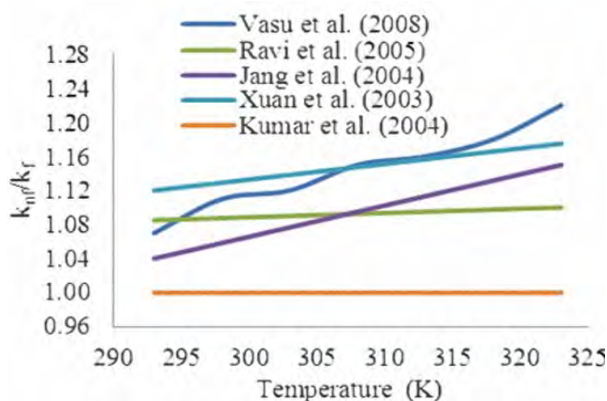
² Dittus-Boelter

¹Thirumarimurugan

با کسر حجمی ۳ درصد افزایشی ۴۰ درصدی در هدایت حرارتی را نشان می دهد [۲۵]. اکنون به خوبی مشخص است که هدایت حرارتی نانو سیال ها با افزایش درصد حجمی نانو ذرات افزایش می یابد. علاوه بر این مشخص می شود که هدایت حرارتی نانو سیال با افزایش دما نیز افزایش خواهد یافت. شکل ۴ و ۵ افزایش هدایت حرارتی نانو سیال با افزایش درصد حجمی نانو ذرات و دما را نشان می دهد.



شکل ۴: هدایت حرارتی نانو سیال ها با درصد حجمی متفاوت از نانو ذرات



شکل ۵: هدایت حرارتی نانو سیال ها با دمای متفاوت

ضریب انتقال حرارت جابجایی

از آنجایی که هدایت حرارتی یکی از مهمترین فاکتورها جهت افزایش انتقال حرارت می باشد کارهای تجربی زیادی در این زمینه گزارش شده است. دانشمندان به این نتیجه رسیدند که افزودن ذراتی در مقیاس نانو به سیال پایه بهترین راه جهت افزایش هدایت حرارتی می باشد. انتقال حرارت جابجایی نیز یکی از مهمترین فاکتورها جهت بهبود انتقال حرارت است. ضریب انتقال حرارت جابجایی آب و نانو سیال های مس-آب، آلومینیوم-آب، آلومینیوم اکسید-آب و تیتانیم اکسید-آب با کسر حجمی ۲ درصد برای یک مبدل حرارتی با جریان متضاد محاسبه شده اند که در شکل ۶ نشان داده شده است.

نتایج نشان می دهد که ضریب انتقال حرارت جابجایی این نانو سیال ها به ترتیب ۰.۸۱، ۰.۶۳، ۰.۶۶، ۰.۶۴ درصد بیشتر از آب خالص و ضریب انتقال حرارتی کلی مبدل به ترتیب ۰.۲۳، ۰.۲۰، ۰.۲۱، ۰.۲۰ درصد بیشتر از ضریب انتقال حرارت مبدل زمان استفاده از آب است. لی و ژان [۱۸] و لی و ژان [۲۶] به طور تجربی جابجایی حرارتی نانو سیال ها را مورد بررسی قرار

یک مبدل حرارتی با جریان مخالف را در نظر بگیرید که سیال گرم داخل لوله ها و سیال سرد بیرون لوله ها جریان دارد و حرارت بین دو سیال مبادله می شود. مقاومت حرارتی کلی مبدل با رابطه زیر بیان می شود:

$$R_{overall} = R_{fs} + R_{wall} + R_c \quad (13)$$

$$\frac{1}{UA_{fs}} = \frac{1}{h_c A_c} + \frac{\ln(r_c/r_s)}{2\pi kl} + \frac{1}{h_{fs} A_{fs}} \quad (14)$$

اگر ما بخواهیم سیال داغ را با نانو سیال در همان سیستم جایگزین کنیم مقادیر مربوط به دیوار و سیال سرد همان مقادیر قبلی خود را دارند. با توجه به روابط بالا مشخص است که با افزایش h_{fs} مقدار U افزایش خواهد یافت. نرخ انتقال حرارت مبدل را می توان از رابطه ی زیر محاسبه کرد.

$$Q = UA\Delta T \quad (15)$$

نتایج

در این آنالیز چهار مبدل حرارتی با دبی جرمی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته اند. شکل ۳ اثر دبی جرمی را بر چهار مبدل نشان می دهد. که بازده مبدل از ۶۱ تا ۶۸ درصد تغییر می کند.



شکل ۳: بازدهی مبدل حرارتی با جریان مخالف

هدایت حرارتی نانو سیال

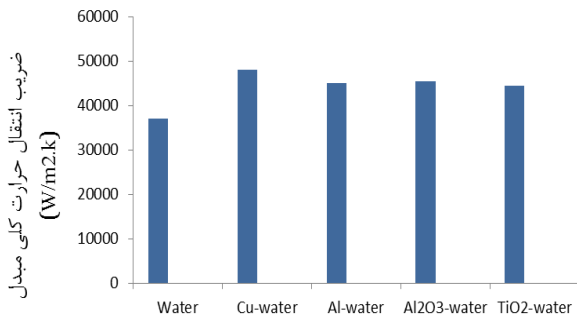
ایستمن^۱ و همکارانش [۲۱] نشان دادند که هدایت حرارتی در یک نانو سیال آب و اکسید مس با درصد حجمی ۵ درصد تقریباً ۶۰ درصد افزایش می یابد.

ژان و لی^۲ [۲۲] هدایت حرارتی نانو سیال مس و آب با درصد حجمی ۲.۵ الی ۷.۵ درصد را حدود ۱.۲۴ الی ۱.۷۸ برابر سیال اصلی اندازه گیری کردند. نانو سیال اتیلن گلیکول - اکسید مس با درصد حجمی ۴ درصد افزایشی بیش ۲۰ درصد را نشان می دهد [۲۳].

اکسید آلومینیوم و اکسید مس با کسر حجمی ۳ درصد در آب حدود ۱۲ درصد افزایش هدایت حرارتی را نشان می دهد [۲۴]. مس در اتیلن گلیکول

¹ Eastman

² Xuan and Li



شکل ۸: ضریب انتقال حرارت کلی مبدل با جریان معکوس

اتلافات در مبدل حرارتی

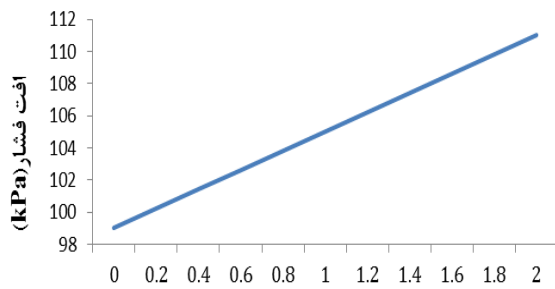
اثر اصطکاک نانو سیال (افت فشار) تقریباً برابر سیال اصلی در سرعت جریان برابر می باشد و با افزایش کسر حجمی نانو سیال تغییر نمی کند. بنابراین نانو سیال هیچ تاثیری بر نیروی پمپ کردن نمی گذارد. بایی^۶ و همکارانش [۶] به این نتیجه رسیدند که ویسکوزیته سیال با به کار بردن نانو ذرات افزایش می یابد.

این قضیه یک مقاومت اصطکاکی در طی جریان سیال ایجاد می کند که باعث افزایش افت فشار می شود. بایی و همکارانش [۶] نشان دادند که کاهش توان پمپاژ یک سیستم سرمایش موتوری تنها ۶ درصد افزایش می یابد که در مقایسه با افزایش ۴۳٫۹ درصدی در ظرفیت اتلاف حرارتی ناچیز است.

در نتیجه هزینه کردن جهت افزایش اندک توان پمپاژ برای افزایش ظرفیت اتلاف حرارتی قابل توجیه است .

لوونگ^۷ و همکارانش [۱۶] تحقیق و آنالیزی بر روی افت فشار و توان پمپ کردن برای یک رادیاتور انجام دادند که در اشکال ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. افت فشار با افزایش درصد نانو ذرات زیادتر می شود.

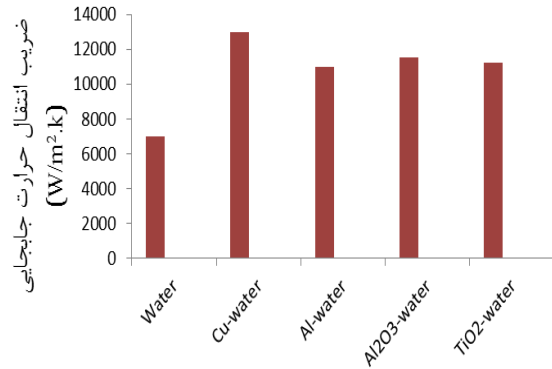
این محققان همچنین نشان دادند که افت فشار برابر با ۱۱۰٫۹ kPa برای ۲ درصد نانو ذرات مس در مقایسه با ۹۸٫۹۳ kPa برای سیال اصلی می باشند. در حالی که توان پمپاژ حدود ۱۲٫۱۳ درصد افزایش می یابد.



کسر حجمی ذرات مس (%)

شکل ۹: اثر نانو ذرات مس روی سیال اصلی بر افت فشار

دادند. و به این نتیجه رسیدند که ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال ها بزرگتر می باشد. ایستمن و چوی^۱ [۲۷] نشان دادند که ضریب انتقال حرارت آب با ۹٪ حجمی از نانو ذرات CuO بیش از ۱۵٪ در مقایسه با آب بدون وجود نانو ذرات بهبود یافته است. نامبورا^۲ و همکارانش [۲۸] به طور عددی جریان آشفته و انتقال حرارت نانو سیال های CuO ، Al₂O₃ ، SiO₂، در یک لوله را مورد بررسی قرار دادند و فهمیدند که عدد ناسلت با افزایش درصد حجمی نانو ذرات افزایش می یابد.



شکل ۶: ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال ها برای یک مبدل حرارتی

زینالی^۳ و همکارانش [۲۹] به طور تجربی نانو سیال آب و اکسید آلومینیوم را در یک لوله ی دایره ای مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که ضریب انتقال حرارت با افزایش نانو ذرات ، افزایش خواهد یافت. یو^۴ و همکارانش [۳۰] آزمایشاتی را با استفاده از نانو سیال کاربید سیلیکون با درصد حجمی ۳٫۷٪ ترتیب دادند و نشان دادند که ضرایب انتقال حرارت ۵۰ الی ۶۰ درصد در مقایسه با سیال پایه افزایش خواهد داشت. کیم^۵ و همکارانش [۳۱] افزایشی ۱۵٪ و ۲۰٪ به ترتیب برای جریان آرام و درهم در مطالعه ی خود بر روی عملکرد انتقال حرارتی نانو سیال ها در یک لوله دایره ای مستقیم را نشان دادند.

ضریب انتقال حرارت کلی مبدل با نانو سیال

بازدهی مبدل حرارتی وابسته به ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال آن می باشد. ضریب انتقال حرارت کلی مبدل با آب و نانو سیال های مس-آب، آلومینیوم-آب ، آلومینیوم اکسید-آب و تیتانیوم اکسید-آب با کسر حجمی ۲ درصد برای یک مبدل حرارتی با جریان متضاد محاسبه به ترتیب ۲۳٪، ۲۰٪، ۲۱٪، ۲۰٪، درصد بیشتر از ضریب انتقال حرارت مبدل زمان استفاده از آب است که این مطلب در شکل ۸ نشان داده شده است.

¹ Eastman and Choi

² Namburu

³ Zeinali

⁴ Yu

⁵ Kim

⁶ Bai

⁷ Leong

Pr	عدد پراتنل
\dot{Q}	نرخ انتقال حرارت (kJ/s)
r	زاویه (m)
R	مقاومت
Re	عدد رینولدز
T	دما (k)
ΔT	اختلاف دما (k)
U	کلی
$\dot{X}_{destroyed}$	نرخ انرژی از بین رفته (kJ/s)
\dot{X}_{in}	نرخ انرژی ورودی (kJ/s)
\dot{X}_{out}	نرخ انرژی خروجی (kJ/s)
$\Delta \dot{X}_{sys}$	نرخ تغییر انرژی (kJ/s)
f	سیال
علائم یونانی	
\square	درصد حجمی
ρ	چگالی (kg/m^3)
زیر نویس ها	
in	ورودی
out	خروجی
min	حداقل
nf	نانو سیال
bf	سیال اصلی
np	نانو ذره
h	سمت داغ
c	سمت سرد

مراجع

[1] M. Hasanuzzaman, N.A. Rahim, R. Saidur and S.N. Kazi, Energy savings and emissions reductions for rewinding and replacement of industrial motor. Energy, 2011. 36(1): pp. 233-240.

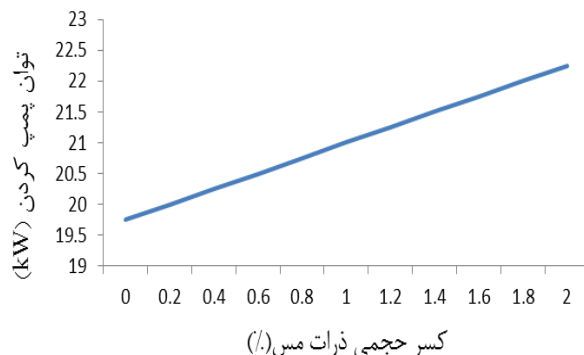
[2] R. Saidur, M. Hasanuzzaman M. A. Sattar, H. H. Masjuki, M. Irfan Anjum and A. K. M. Mohiuddin, An analysis of energy use, energy intensity and emissions at the industrial sector of Malaysia, International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2007. 2(1): pp. 84 - 92.

[3] S. M. S. Murshed, K. C. Leong, and C. Yang, Thermophysical and electrokinetic properties of Nanofluids - A critical review. Applied Thermal Engineering, 2008. 28(17-18): pp. 2109-2125.

[4] W. Daungthongsuk and S. Wongwises, A critical review of convective heat transfer of nanofluids. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007. 11(5): pp. 797-817.

[5] P. Keblinski, I. A. Eastman and D. G. Cahill, Nanofluids for thermal transport. Materials Today, 2005. 8(6): pp. 36-44.

[6] M. Bai, Z. Xu, and I. Lv, Application of Nanofluids in Engine Cooling System. SAE International, 2008-01-18, 2008.



شکل ۱۰: اثر نانوذرات مس روی سیال اصلی بر توان پمپاژ

به خاطر این اثرات یک آنالیز ترمودینامیکی جهت بهینه کردن انتقال حرارت و افت فشار نیاز می باشد. اگرچه افت فشار در مبدل های حرارتی در زمان افزایش بازدهی مبدل و در نتیجه کاهش اندازه مبدل و کاهش قیمت تمام شده ی آن، چندان مهم نخواهد بود [۹].

واحدهای صنعتی نیاز به کاهش اندازه و وزن تجهیزات مبدل حرارتی خود دارند که نانو سیال ها می توانند بهترین کاندید برای این امر باشند. در واقع نانو سیال ها یک عملکرد بالقوه برای حمایت از تلاش صنایع جهت کوچک کردن سیستم ها و تجهیزانشان می باشند (تجهیزات مبدل حرارتی فشرده و سبک) [۳]. با کوچک شدن مبدل حرارتی، سیال مورد نیاز مبدل نیز کمتر شده و باعث صرفه جویی اقتصادی می شود.

لوونگ و همکارانش [۱۶] رادیاتور یک ماشین را مورد بررسی قرار دادند و کاهش ۱۸.۷ درصدی در هوای محیط جلو را با استفاده از نانو سیال نقره ۲ درصد تخمین زدند. هدایت حرارتی بالاتر نانو سیال ها باعث بازده حرارتی بالاتر، عملکرد بهتر، کاهش مصرف انرژی و هزینه عملکرد پایین تر خواهد شد [۴].

بسیار واضح است که نانو سیال ها می توانند به عنوان بهترین گزینه برای توسعه ی تجهیزات انتقال حرارتی باشند. در نتیجه این یک فرصت خوب برای مهندسان است تا مبدل های فشرده و کوچکتری را طراحی کنند [۴].

نتیجه گیری

در این تحقیق مشخص شد که بازدهی مبدل های حرارتی از ۶۱ تا ۷۱ درصد متفاوت خواهد بود. ضریب انتقال حرارت جایجایی نانو سیال های مس-آب، آلومینوم-آب، آلومینوم اکسید-آب و تیتانیوم اکسید-آب به ترتیب ۸۱٪، ۶۳٪، ۶۶٪، ۶۴٪ درصد بیشتر از آب خالص و ضریب انتقال حرارت کلی مبدل برای نانو سیال های مس-آب، آلومینوم-آب، آلومینوم اکسید-آب و تیتانیوم اکسید-آب به ترتیب ۲۳٪، ۲۰٪، ۲۱٪، ۲۰٪ درصد بیشتر از ضریب انتقال حرارت مبدل زمان استفاده از آب است.

فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
cp	گرمای ویژه در فشار ثابت (kJ/kg. K)
h	انتالپی (kJ/s)
k	هدایت حرارتی (W/m. K)
L	طول (m)
\dot{m}	دبی جرمی هوا (kg/s)
Nu	عدد ناسلت

- Enhancements with Al_2O_3 Nanofluid and Twisted Tape Insert in a Circular Tube. *International Journal of Nanotechnology and Applications*, 2007.1(2): pp.21-28.
- [20] B. C. Pak and Y. I. Cho, Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles. *Experimental Heat Transfer*, 1998. 11(2): pp. 151-170.
- [21] J. A. Eastman, et al., Enhanced thermal conductivity through the development of Nanofluids, *Nanophase and Nanocomposite Materials II*. MRS, Pittsburg, PA. 1997: pp. 3-11.
- [22] Y. Xuan and Q. Li, Heat transfer enhancement of Nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000. 21(1): pp. 58-64.
- [23] S. Lee, et al., Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. *Journal of Heat Transfer* 1999. 121: pp. 280-289.
- [24] X. Wan, X. Xu, and S. U. S. Choi, Thermal Conductivity of Nanoparticle - Fluid Mixture. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 1999.13(4): pp.474-480.
- [25] J. A. Eastman, et al., Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based Nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physics Letters* 2001. 78(6): pp. 718--20.
- [26] Q. Li and Y. Xuan, Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid. *Science in China (Series E)*, 2002. 45(4): pp. 408-416.
- [27] J. A. Eastman and U. S. Choi, Novel thermal properties of Nanostructured materials. *Material Science Forum*, 312- 314, 1999: p. 629 -634.
- [28] P. K. Namburu, et al., Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of Nanofluids considering variable properties. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009. 48(2): pp. 290-302.
- [29] S. Zeinali Heris, M. Nasr Esfahany, and S. G. Etemad, Experimental investigation of convective heat transfer of Al_2O_3 /water nanofluid in circular tube. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2007. 28(2): pp. 203-210.
- [30] W. Yu, D.M France, D.S. Smith, D. Singh, E.V Timofeeva and J.L. Routbort, Heat transfer to a silicon carbide/water nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009. 52(15-16): pp. 3606-3612.
- [31] D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. Li , S. Cheong, Y. Hwang, J. Lee, D. Hong and S. Moon, Convective heat transfer characteristics of Nanofluids under laminar and turbulent flow conditions. *Current Applied Physics*, 2009. 9(2, Supplement 1): pp. e119-e123.
- [7] M. Thirurnmurugan, T. Kannadasan, and E. Ramasamy, Performance Analysis of Shell and Tube Heat Exchanger Using Miscible System. *American Journal of Applied Sciences* 2008. 5(5): pp. 548-552.
- [8] P. Naphon, Thermal performance and pressure drop of the helical-coil heat exchangers with and without helically crimped fins. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007. 34(3): pp. 321-330.
- [9] A. Durmus, et al., Investigation of heat transfer and pressure drop in plate heat exchangers having different surface profiles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009. 52(5-6): pp. 1451-1457.
- [10] S. Eiamsa-ard and P. Promvong, Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators. *Solar Energy*, 2005. 78(4):pp.483-494.
- [11] M. Hasanuzzaman, R. Saidur, and H. H. Masjuki, Effects of operating variables on heat transfer and energy consumption of a household refrigerator-freezer during closed door operation. *Energy*, 2009.34(2):pp. 196-198.978-1-4577-1354-5/11/\$26.00 2011©IEEE 103
- [12] M. Hasanuzzaman, R. Saidur, and H.H. Masjuki, Moisture transfer and energy losses of household refrigerator-freezer during the closed door operation. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2008. 3(1): pp. 30-37
- [13] R. Saidur, I. U. Ahamed, and H. H. Masjuki, Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers. *Energy Policy*, 2010. 38(5): pp. 2188-2197.
- [14] M. Hasanuzzaman, R. Saidur and N.A. Rahim, Energy, exergy and economic analysis of an annealing furnace. *International Journal of Physical Sciences* 2011. 6(6): pp. 1257-1266.
- [15] D. Wen and Y. Ding, Experimental investigation into convective heat transfer of Nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004. 47(24): pp. 5181-5188.
- [16] K. Y. Leong, et al., Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator). *Applied Thermal Engineering*, 2010.30(17-18):pp. 2685-2692.
- [17] V. Vasu, K. R. Krishna, and A. C. S. Kumar Thermal design analysis of compact heat exchanger using Nanofluids. *International Journal of Nanomanufacturing*, 2008. 2(3): pp. 271-288.
- [18] Y. Xuan and Q. Li, Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 2003. 125(1): pp. 151-155.
- [19] L. S. Sundar, K. V. Sharma, and S. Ramnathan, Experimental investigation of Heat Transfer