

تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری در مخازن همزده حاوی سوسپانسیون

علی اصغر حمیدی

دانشیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

منیژه خدایاری

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۹/۱۰/۲۱، تاریخ تصویب ۸۰/۱۲/۱۱)

چکیده

چگونگی انتقال حرارت در فرآیندهایی که در آنها پدیده‌های فیزیکی مانند انتقال جرم و واکنشهای شیمیایی در سیستم‌های سوسپانسیونی (جامد-مایع) صورت می‌گیرد، از اهمیت بسیاری برخوردار است.

تحقیق تجربی حاضر به بررسی ضریب انتقال حرارت در سیستم سوسپانسیونی ماسه و آب می‌پردازد که در آن، ذرات ماسه دارای اندازه‌های متغیری در محدوده ۲۰۰ الی ۸۰۰ میکرومتر با غلظت ۲/۱۴ تا ۱۰/۳ درصد وزنی می‌باشد. سوسپانسیون در مخزنی دو جداره به قطر ۲۹ سانتیمتر و ارتفاع مفید ۳۵ سانتیمتر قرار داده می‌شود. مخزن مجهز به یک همزن توربینی چهار تیغه است که سرعت دورانی آن را می‌توان از ۷۰۰ الی ۱۴۰۰ دور بر دقیقه تغییر داد. ضریب انتقال حرارت جابجایی برحسب متغیرهای متعدد تعیین گردیده است و سپس با استفاده از روش آنالیز ابعادی رابطه‌ای تجربی براساس گروههای بدون بعد حاکم در این خصوص بدست آورده شده است. نتایج بدست آمده از آزمایشات نشان می‌دهد که افزایش غلظت جامد در سوسپانسیون، منجر به کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود، اما افزایش قطر ذره جامد و نیز سرعت دورانی پره، ضریب انتقال حرارت جابجایی را افزایش می‌دهد.

واژه های کلیدی : ضریب انتقال حرارت، مخازن همزده، سوسپانسیون، روابط تجربی

مقدمه

در بسیاری از فرآیندهای صنعتی با سوسپانسیونهای (جامد - مایع) همزدهای مواجه هستیم، که در آنها واکنشهای شیمیایی به شکل گرمازا و یا گرماگیر می‌باشند. در چنین حالتی دست یافتن به دیدگاهی از نحوه انتقال حرارت، می‌تواند فرآیند را از نظر این امر مهم، کنترل پذیر سازد.

افزایش حرارت داخل این مخازن به بیش از حد مجاز منجر به بروز مسائلی، مانند ایجاد نقاط داغ می‌شود که با تشکیل واکنشهای زنجیره‌ای و یا واکنشهای نامطلوب جانبی، محصول مطلوب فرآیند را دچار دگرگونی می‌سازد.

در سال ۱۹۵۰، West و Cummings [۱] اولین تحقیقات را در مورد انتقال حرارت از دیوار مخزن به دوغابها و سوسپانسیونهای همزده مورد بررسی قرار دادند. نتایجی که بدست آمد کاهش سرعت انتقال حرارت را، در دوغابها و سوسپانسیونها در مقایسه با مایعات خالص نشان

می‌داد. در سال ۱۹۸۱، Chen و Sohn [۲] افزایش ضریب هدایت حرارتی رادر سیستمهای سوسپانسیونی از ذرات پلی اتیلن، در مخلوطی از روغن سیلیکون و نفت خام و پلی استایرن در مخلوطی از روغن سیلیکون و فرئون ۱۱۳ مشاهده نمودند.

در سال ۱۹۶۸ معادلات مقدماتی حاکم بر سیستمهای دوفازی جامد - مایع توسط Frantisak و همکاران [۳] توضیح داده شد. راه حل این معادلات با یک بیان تحلیلی برای انتقال حرارت، در سوسپانسیونهای همزده در غیاب نتایج آزمایشی برای ضرایب نفوذ، عدد پراتل و نیمرخ سرعت غیرممکن بود.

در سال ۱۹۷۵، Trivedi و همکاران [۴] انتقال حرارت را در یک مخزن همزده ژاکت دار بررسی کردند و افزایش سرعت انتقال حرارت را، با افزایش غلظت ذرات جامد مشاهده نمودند. در سال ۱۹۹۵، Pandey و Ramasubramanian [۵] مطالعاتی روی سوسپانسیونهای جامد انجام دادند. آنها این مطالعات را بر روی سوسپانسیونهای ماسه - آب و زغال - آب در یک مخزن همزده، مجهز به کویل

و ارتفاع ۳۵ سانتیمتر است. دیواره خارجی مخزن کاملاً عایق شده است. داخل مخزن، ۴ بافل به شکل ورقه هایی به پهنای ۳ سانتیمتر برای جلوگیری از گردابه، با کمی فاصله از کف مخزن متصل گردیده است. فاصله مذکور برای جلوگیری از به تله افتادن ذرات ماسه در نظر گرفته شده است. ذرات ماسه استفاده شده ماسه طبیعی بوده است که توسط سرند آزمایشگاهی طبقه بندی شده است. قطره های ذرات ماسه که کروی نیز فرض شده اند تقریبی می باشند.

عمل همزدن محتویات مخزن، توسط یک همزن چهار تیغه کج به قطر ۱۲ سانتیمتر که از بالای مخزن وارد شده است انجام می گیرد. برای به حرکت درآوردن آن الکتروموتوری با سرعت متغیر صفر تا ۱۴۰۰ دور بر دقیقه به صورت تک فاز (۲۲۰ ولت) باتوان ۱ اسب بخار به آن وصل شده است. برای کنترل دور الکتروموتور نیز از یک وارونه کننده^۱ دیجیتالی استفاده گردیده است. به منظور مشاهده درجه حرارت داخل مخزن و دیواره داخلی آن ترموکوپلهایی که از دریچه مخزن وارد شده اند به کار رفته است

سرمایشی به انجام رساندند. در این آزمایشات اندازه ذرات به حدی کم بود که از تاثیر این پارامتر صرف نظر شده بود. در طی این مطالعات، آنها مشاهده نمودند که افزایش غلظت ذرات جامد، منجر به کاهش ضریب انتقال حرارت در سوسپانسیونها می گردد.

در کار حاضر ضریب انتقال حرارت جابجائی، در یک مخزن همزده ژاکت دار، برای سوسپانسیونهای ماسه - آب بررسی شده است، که در آن تاثیر افزایش غلظت ذرات جامد و سرعت چرخشی همزن بر روی این ضریب مشاهده شده است. اما آنچه که این تحقیق را از کارهای انجام شده قبلی متمایز می سازد بررسی تاثیر اندازه ذرات جامد در روند انتقال حرارت می باشد که در این زمینه رابطه ای از آنالیز ابعادی پارامترهای تغییر داده شده بدست آمده است.

مطالعات آزمایشگاهی

دستگاه آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل (۱) شامل یک مخزن به قطر ۲۹ سانتیمتر و طول ۵۰ سانتیمتر می باشد که دارای یک ژاکت به ضخامت ۸ میلی متر

می یابد که دمای داخل مخزن و یا آب خروجی از ژاکت ثابت بماند.

جدول ۱: خواص فیزیکی ماسه.

متغیرها	مقدار
ρ	$1800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
C_p	$850 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
k	$1/5 \frac{\text{w}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$

در این حالت انتقال حرارت داخل مخزن و دیواره به شکل پایدار و مستقل از زمان صورت می گیرد. در این لحظه دمای داخلی مخزن، دیواره داخلی و دمای ورودی و خروجی آب به ژاکت ثبت می شود. این آزمایش برای درصدهای وزنی $3/2$ ، $4/25$ ، $3/6$ و $10/3$ برای ذرات با اندازه 200 میکرومتر در سرعت ثابت 1400 دور بر دقیقه و سپس برای اندازه های 400 ، 600 و 800 میکرومتر در دور و غلظت های ذکر شده برای بررسی تاثیر اندازه ذرات نیز تکرار می شود.

برای مشاهده تاثیر دور پره بر انتقال حرارت، آزمایش فوق مجدداً در 700 ، 1000 و 1400 دور بر دقیقه برای درصد

که به صفحه نمایشی متصل اند. برای تنظیم دبی آب ورودی به ژاکت از یک روتامتر استفاده شده و در ورودی و خروجی آب به ژاکت ترمومترهایی نصب شده اند که با استفاده از آنها این دماها قابل قرائت می باشند. گرمایش محتویات مخزن توسط یک المنت حرارتی انجام می شود و کنترل دمای المنت بوسیله یک ترموستات که در مسیر آن قرار دارد انجام می گیرد.

برای بررسی تاثیر غلظت ذرات بر ضریب انتقال حرارت ابتدا ذرات 200 میکرومتری ماسه با غلظت $2/14$ درصد وزنی استفاده گردید (خواص فیزیکی ماسه در جدول (۱) ذکر شده است). بدین ترتیب که مخزن تا ارتفاع 35 سانتیمتر با آب و مقدار مذکور از ماسه پر می شود (لازم به ذکر است که ابتدا مخزن تا حد معینی از آب پر می شود و در حالیکه پره آغاز به کار می نماید ماسه نیز به آن اضافه می گردد. افزودن ماسه در حین کار پره برای ممانعت از ته نشینی آن است). سپس المنت حرارتی شروع به گرم نمودن محتویات مخزن می نماید و در همین زمان آب سرد، با دبی 500 لیتر بر ساعت به درون ژاکت جریان می یابد. این عمل تا جایی ادامه

$$q = hA(T - T_w) \quad (1)$$

این، معادل گرمایی است که توسط آب جاری از ژاکت منتقل می‌شود:

$$q = mC_p(T_i - T_0) \quad (2)$$

برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف، از قبیل دانسیته ρ ، سرعت دورانی پره N ، ویسکوزیته μ ، ظرفیت گرمایی ویژه C_p ، ضریب هدایت حرارتی k ، قطر ذره d_p ، قطر مخزن T' می‌توان از طریق آنالیز ابعادی به رابطه زیر دست یافت:

$$\frac{hT'}{k} = K \left(\frac{\rho ND^2}{\mu} \right)^a \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^b \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^c \left(\frac{d_p}{D} \right)^d \quad (3)$$

که باتوجه به نتایج آزمایشگاهی، وابستگی عدد بدون بعد ناسلت به هریک از گروههای بدون بعد به شکل زیر است:

تاثیر سرعت دورانی پره بر ضریب انتقال

حرارت جابجایی

مطابق با نتایج بدست آمده در نمودار

شکل (۲)، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت دورانی پره، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد، که این عامل در عدد بدون بعد رینولدز ظاهر

وزنی مشخصی از اندازه های مختلف ذرات انجام می‌شود.

شکل ۱: شماتیک دستگاه آزمایشگاهی.

بررسی نتایج آزمایش

در محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی داخل مخزن با استفاده از نتایج آزمایشی از رابطه معروف انتقال حرارت جابجایی استفاده شده است:

سه گروه بدون بعد عدد رینولدز، عدد پراتل و $\frac{\mu}{\mu_w}$ می گذارد. با استفاده از آنالیز ابعادی در اندازه ثابت ذره به رابطه زیر می توان دست یافت:

$$N_{Nu} \propto (N_{Re})^a (N_{Pr})^b \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^c \quad (5)$$

که برای خواص فیزیکی موجود در این گروهها اعم از ρ ، μ ، C_p و k از خواص فیزیکی دوغابها و سوسپانسیونها به قرار زیر استفاده شده است [۶]:

$$\rho_s = \phi_p \rho_p + \phi_l \rho_l$$

$$\frac{\mu_s}{\mu_l} = 10^{1.82\phi_s / \phi_l}$$

$$C_{ps} = \omega_p C_{pp} + \omega_l C_{pl}$$

$$k_s = k_l [2k_l + k_p - 2\phi_p (k_l - k_p)] / [2k_l + k_p + \phi_p (k_l - k_p)]$$

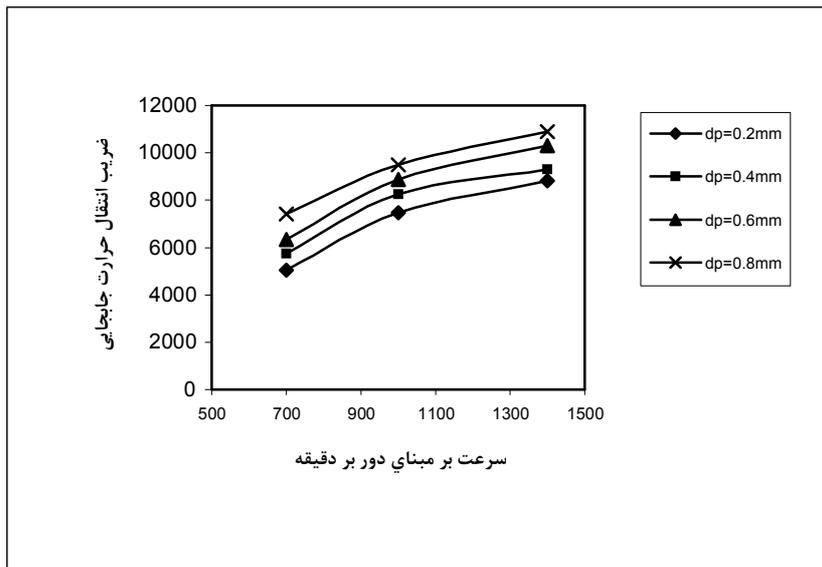
می شود. با محاسبه عدد ناسلت و بررسی آن براساس تغییرات عدد رینولدز مشاهده می شود که بین این دو گروه بدون بعد رابطه مستقیمی وجود دارد و این رابطه به شکل زیر است:

$$N_{Nu} \propto N_{Re}^{0.7} \quad (4)$$

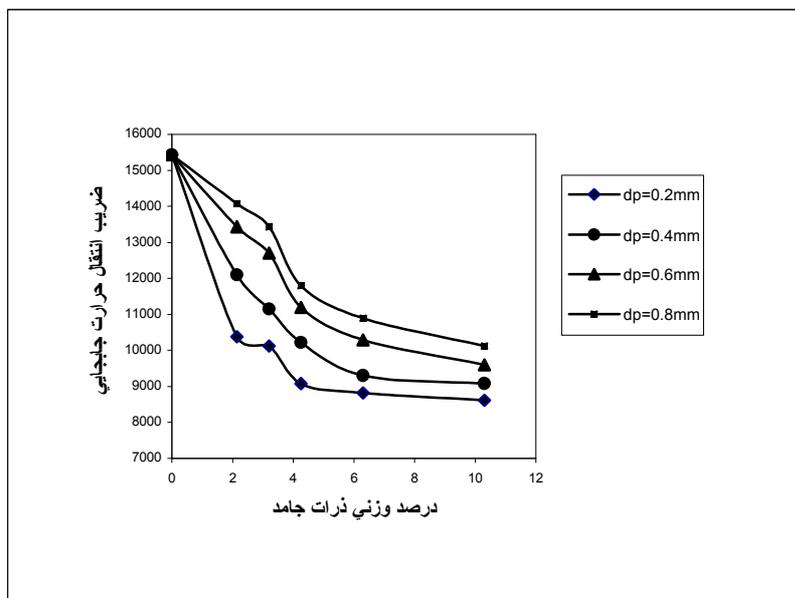
این نتیجه در سال ۱۹۹۵ توسط Pandey و Ramasubramanaia بدست آمده است.

تاثیر غلظت ذرات بر ضریب انتقال حرارت جابجائی

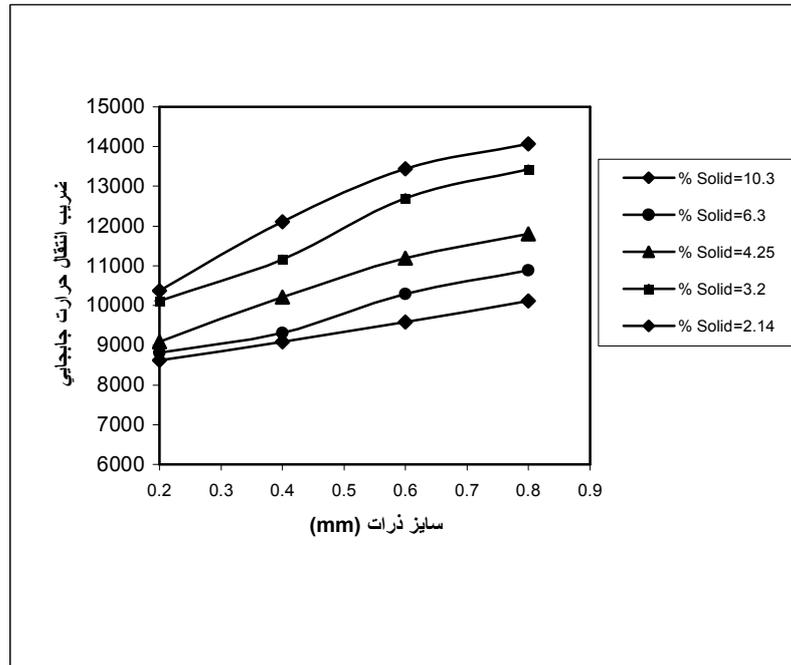
در نمودار شکل (۳) مشاهده می گردد که در یک اندازه ثابت از ذرات در غلظتهای متفاوت، با افزایش درصد وزنی جامد، ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد. این کاهش ناشی از کم شدن ظرفیت حرارتی ویژه سوسپانسیون، در مقایسه با آب است. افزایش غلظت تاثیر خود را بر



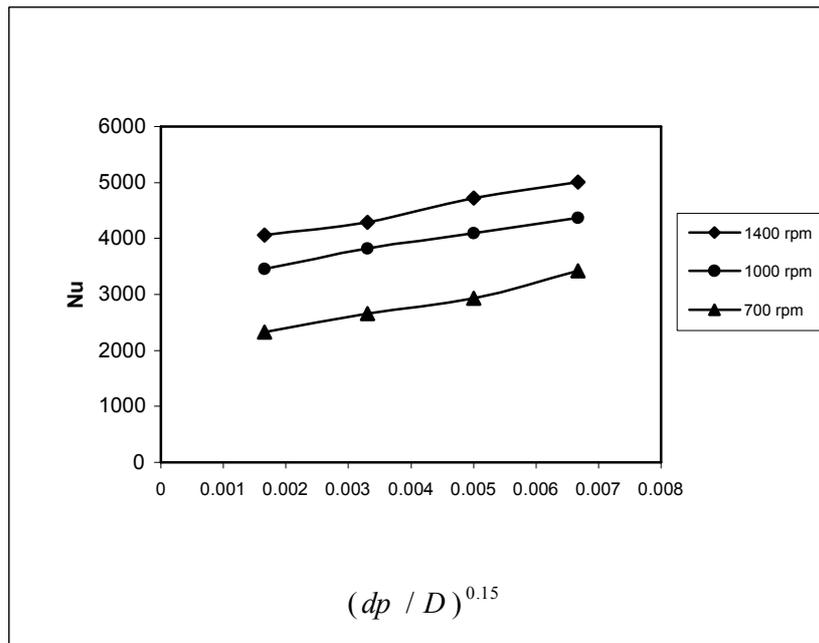
شکل ۲: ضریب انتقال حرارت جابجایی تجربی نسبت به تغییر سرعت دورانی همزن در ۶/۳ درصد وزنی از جامد.



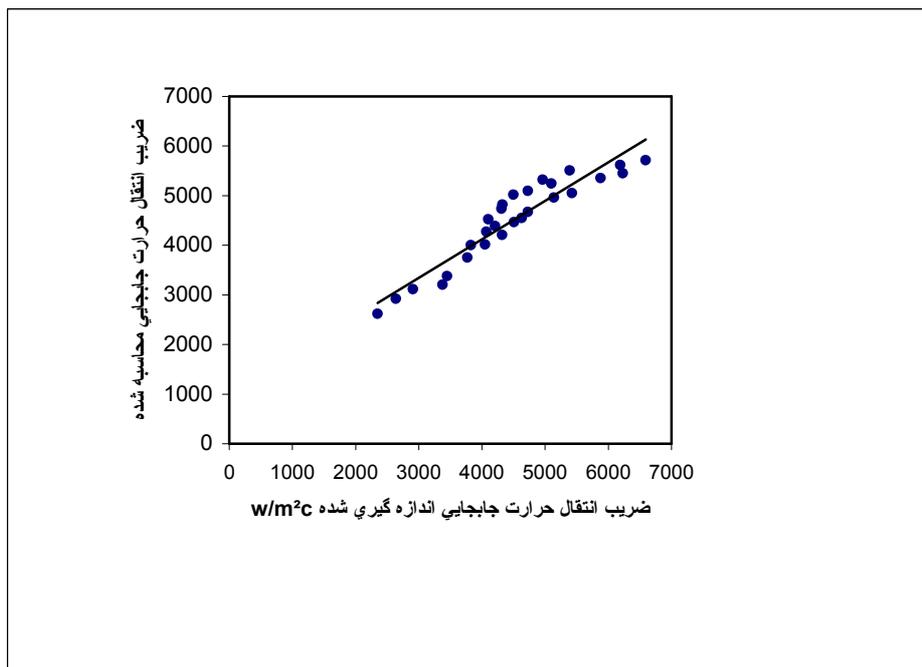
شکل ۳: ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به درصد وزنی جامد در اندازه‌های مختلف با سرعت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه.



شکل ۴: ضریب انتقال حرارت جابجایی تجربی نسبت به سایز ذرات در ۱۴۰۰ دور بر دقیقه.



شکل ۵ : تغییرات عدد ناسلت نسبت به $(d_p / D)^{0.15}$.



شکل ۶ : مقایسه مطابقت مقادیر اعداد ناسلت اندازه گیری شده با مقادیر محاسبه شده از رابطه تجربی.

می‌گردد حداکثر اختلاف در حدود ۱۰ درصد است.

آنچه واضح به نظر می‌رسد، تاثیر پارامترهای مهم مانند ρ ، μ ، C_p ، k و N بر روی مقدار ضریب انتقال حرارت جابجائی و عددناسلت است. در واقع افزایش غلظت ذرات جامد به علت کاهش ظرفیت گرمایی ویژه منجر به کاهش ضریب انتقال حرارت جابجائی میشود. از سوی دیگر افزایش اندازه قطر ذرات باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود و این می‌تواند به علت کاهش ویسکوزیته سوسپانسیون با افزایش اندازه ذرات باشد، که در ذرات بزرگتر از جامد خواص سوسپانسیون به سیال نیوتنی آب نزدیکتر است.

نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر عوامل متعدد بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی در مخازن همزن دار حاوی سوسپانسیون مورد مطالعه قرار گرفته است. تاکید اصلی تحقیق بر روی تاثیر اندازه و غلظت ذرات درون سوسپانسیون بوده است. یک رابطه تجربی با گروههای بدون بعد بدست

تاثیر اندازه ذرات بر ضریب انتقال حرارت جابجائی

نمودار شکل (۴) تغییرات این ضریب را نسبت به اندازه ذرات در درصدهای وزنی متفاوت از جامد نشان می‌دهد. مطابق با نتایج بدست آمده مشخص گردید که، افزایش اندازه ذرات ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. تاثیر این پارامتر را می‌توان تحت یک گروه بدون بعد بر روی عدد ناسلت مشاهده نمود:

$$N_{Nu} \alpha \left(\frac{d_p}{D}\right)^{0.15} \quad (6)$$

k ثابت بدون بعد معادله که به خواص ترموفیزیکی سیستم وابسته است، معادل ۰/۸۵ تعیین گردید. نمودار شکل (۵) مقادیر عددی ناسلت تجربی و محاسبه شده از رابطه (۳) را تحت شرایط آزمایش نسبت به تغییر قطر ذرات نشان می‌دهد. معادله بدست آمده با اعداد حاصل از آزمایش مطابقت خوبی دارد. شکل (۶) مقایسه اعداد ناسلت تجربی با مقادیر محاسبه شده از این رابطه تجربی است و همانگونه که مشاهده

T' : قطر مخزن

حروف یونانی

μ : ویسکوزیته توده در دمای مخزن

ρ : دانسیته

ϕ : جزء حجمی

ω : جزء وزنی

زیرنویسها

c : محاسباتی

e : تجربی

i : آب ورودی به ژاکت

o : آب خروجی از ژاکت

w : دیواره

l : مایع

p : ذره

s : سوسپانسیون

آمده است که از طریق آن می توان تاثیر پارامترها را بر روی h مشاهده کرد. در شرایط کاملا یکسان ضریب انتقال حرارت با $d_p^{0.15}$ تغییر می کند.

فهرست علائم

A : سطح انتقال حرارت

C_p : ظرفیت گرمایی ویژه

d_p : قطر ذره

D : قطر پره

h : ضریب انتقال حرارت جابجایی

k : ضریب هدایت حرارتی

K : ثابت بدون بعد معادله (۶)

m : دبی جرمی آب

N : سرعت دورانی پره

N_{Nu} : عدد بدون بعد ناسلت

N_{Re} : عدد بدون بعد رینولدز

N_{Pr} : عدد بدون بعد پرائتل

T : درجه حرارت

مراجع

- 1 - Cummings, G. H. and West, A. S. (1950). "Heat transfer data for kettles with jackets and coils." *Industrial and Eng. Chem.*, Vol. 42, No. 11, PP. 2303-2313.

- 2 - Sohn, C. W. and Chen, M. M. (1981). *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 103, PP. 47-51.
- 3 - Frantisak, F., Smith, J. W. and Dohnal, J. (1968). *Industrial and Eng. Chem. Process Design and Development*, Vol. 7, No. 2, PP. 188-193.
- 4 - Trivedi, R. N., Pandey, G. N. and Tripathi, G. (1975). "Heat transfer to solid-liquid suspensions in jacketed agitated vessels." *Indian Journal of Technology*, Vol. 13, PP. 53-58.
- 5 - Ramasubramanaian, A. and Pandey, S. K. (1995). "Agitation and heat transfer studies in suspensions." *Transactions of the ASME*, Vol. 117, PP. 224-226.
- 6 - Narayanan, C. M. and Bhattacharyya, B. C. (1992). *Mechanical operating for chemical engineers*, Khanna, Delhi.
- 7 - MC Dounogh, R. J. (1992). *Mixing for the Process Industries*, Van Nostrand Reinhold.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 – Inventor

w/m²c

w/m²c

w/m²c

Nu

Nu