

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 متنوعی 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

می‌داد. در سال ۱۹۸۱، Sohn و Chen [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 فرتون 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، Ramasubramanian

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

مشاهده درجه حرارت داخل مخزن و دیواره داخلی آن ترموکوپلهایی که از دریچه مخزن وارد شده‌اند به کاررفته است که به صفحه نمایشی متصل‌اند. برای تنظیم دبی آب ورودی به ژاکت از یک روماتر استفاده شده و در ورودی و خروجی آب به ژاکت ترمومترهایی نصب شده‌اند که با استفاده از آنها این دماها قابل قرائت می‌باشند. گرمایش محتویات مخزن توسط یک المنت حرارتی انجام می‌شود و کنترل دمای المنت بوسیله یک ترموستات که در مسیر آن قرار دارد انجام می‌گیرد.

برای بررسی تاثیر غلظت ذرات بر ضریب انتقال حرارت ابتدا ذرات ۲۰۰ میکرومتری ماسه با غلظت ۲/۱۴ درصد وزنی استفاده گردید (خواص فیزیکی ماسه در جدول (۱) ذکر شده است). بدین ترتیب که مخزن تا ارتفاع ۳۵ سانتیمتر با آب و مقدار مذکوراز ماسه پر می‌شود (لازم به ذکر است که ابتدا مخزن تا حد معینی از آب پر می‌شود و در حالیکه پره آغاز به کار می‌نماید ماسه نیز به آن اضافه می‌گردد. افزودن ماسه در حین کار پره برای ممانعت از ته نشینی آن است). سپس المنت حرارتی شروع به گرم نمودن محتویات مخزن می‌نماید و در همین زمان آب سرد، با دبی ۵۰۰ لیتر بر ساعت به درون ژاکت جریان می‌یابد. این عمل تا جایی ادامه می‌یابد که دمای داخل مخزن و یا آب خروجی از ژاکت ثابت بماند.

جدول ۱: خواص فیزیکی ماسه.

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

در این حالت انتقال حرارت داخل مخزن و دیواره به شکل پایدار و مستقل از زمان صورت می‌گیرد. در این لحظه دمای داخلی مخزن، دیواره داخلی و دمای ورودی و خروجی آب به ژاکت ثبت می‌شود. این آزمایش برای درصدهای وزنی ۳/۲، ۴/۲۵، ۳/۶ و ۱۰/۳ برای ذرات با اندازه ۲۰۰ میکرومتر در سرعت ثابت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و سپس برای اندازه های ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرومتر در

Pandey [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 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 می‌گردد.

در کار حاضر ضریب انتقال حرارت جابجائی، در یک مخزن همزده ژاکت دار، برای سوسپانسیونهای ماسه - آب بررسی شده‌است، 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 می‌سازد بررسی تاثیر اندازه ذرات جامد در روند انتقال حرارت می‌باشد که در این زمینه رابطهای 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 می‌باشد که دارای یک ژاکت به ضخامت ۸ میلی متر 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 بوده‌است که توسط سرنده آزمایشگاهی طبقه بندی شده است. قطرهای ذرات ماسه که کروی نیز فرض شده‌اند تقریبی می‌باشند.

عمل همزدن محتویات مخزن، توسط یک همزن چهارتیغه کج به قطر ۱۲ سانتیمتر که از بالای مخزن وارد شده است انجام می‌گیرد. 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 گردیده‌است. به منظور

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

$$N_{Nu} \propto N_{Re}^{0.7} \quad (۴)$$

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

تاثیر غلظت ذرات بر ضریب انتقال حرارت جابجایی

در نمودار شکل (۳) مشاهده می‌گردد که در یک اندازه ثابت از ذرات در غلظتهای متفاوت، با افزایش درصد وزنی جامد، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از کم شدن ظرفیت حرارتی ویژه سوسپانسیون، در مقایسه با آب است. افزایش غلظت تاثیر خود را بر سه گروه بدون بعد عدد رینولدز، عدد پراتل و $\frac{\mu}{\mu_w}$ می‌گذارد. با استفاده از آنالیز ابعادی در اندازه ثابت ذره به رابطه زیر می‌توان دست یافت:

$$N_{Nu} \propto (N_{Re})^a (N_{Pr})^b \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^c \quad (۵)$$

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]:

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

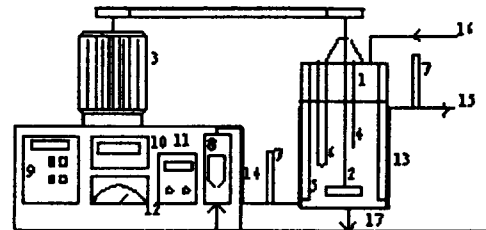
$$\frac{\mu_s}{\mu_l} = 10^{1.82\phi_p / \phi_l}$$

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

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

دور و غلظتهای ذکر شده برای بررسی تاثیر اندازه ذرات نیز تکرار می‌شود.

برای مشاهده تاثیر دور پره بر انتقال حرارت، آزمایش فوق مجدداً در ۷۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ دور بر دقیقه برای درصد وزنی مشخصی از اندازه های مختلف ذرات انجام می‌شود.



۱- مخزن ۲- توربین چهارپره ۳- الکتروموتور ۴- سنسور حرارتی ۵- بافل ۶- المنت حرارتی ۷- ترمومتر ۸- روتامتر ۹- صفحه نمایش دور الکتروموتور ۱۰- صفحه نمایش درجه حرارت ۱۱- ترموستات ۱۲- آمپرستج ۱۳- ژاکت ۱۴- آب ورودی به ژاکت ۱۵- آب خروجی از ژاکت ۱۶- آب ورودی به مخزن ۱۷- آب خروجی از مخزن

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:

$$q = hA(T - T_w) \quad (۱)$$

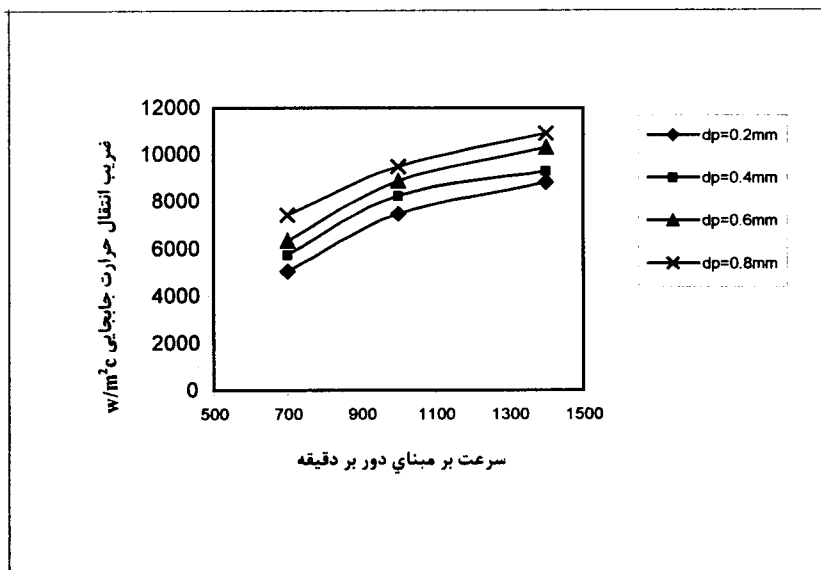
این، معادل گرمایی است که توسط آب جاری از ژاکت منتقل می‌شود:

$$q = mC_p(T_i - T_0) \quad (۲)$$

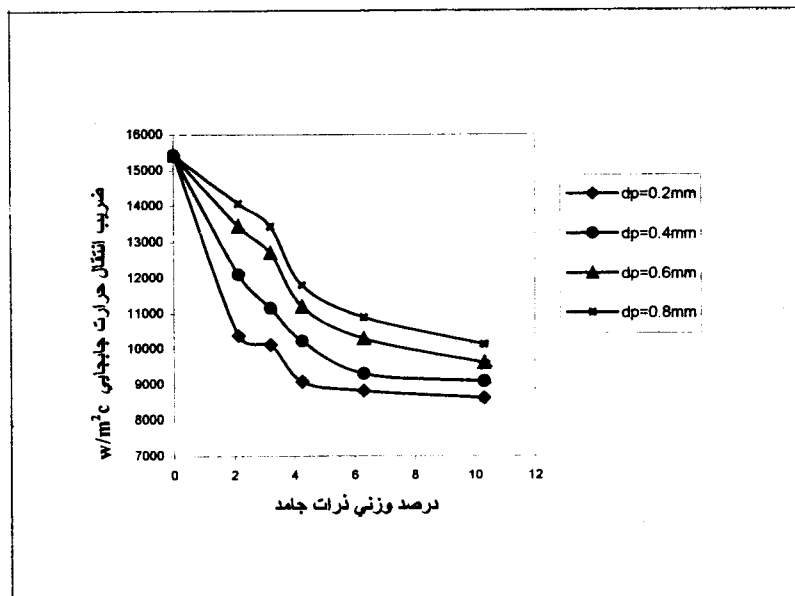
برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف، از قبیل دانسیته ρ ، سرعت دورانی پره N ، ویسکوزیته μ ، ظرفیت گرمایی ویژه C_p ، ضریب هدایت حرارتی k ، قطر ذره dp ، قطر مخزن T' می‌توان از طریق آنالیز ابعادی به رابطه زیر دست یافت:

$$\frac{hT'}{k} = K \left(\frac{\rho ND^2}{\mu}\right)^a \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^b \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^c \left(\frac{d_p}{D}\right)^d \quad (۳)$$

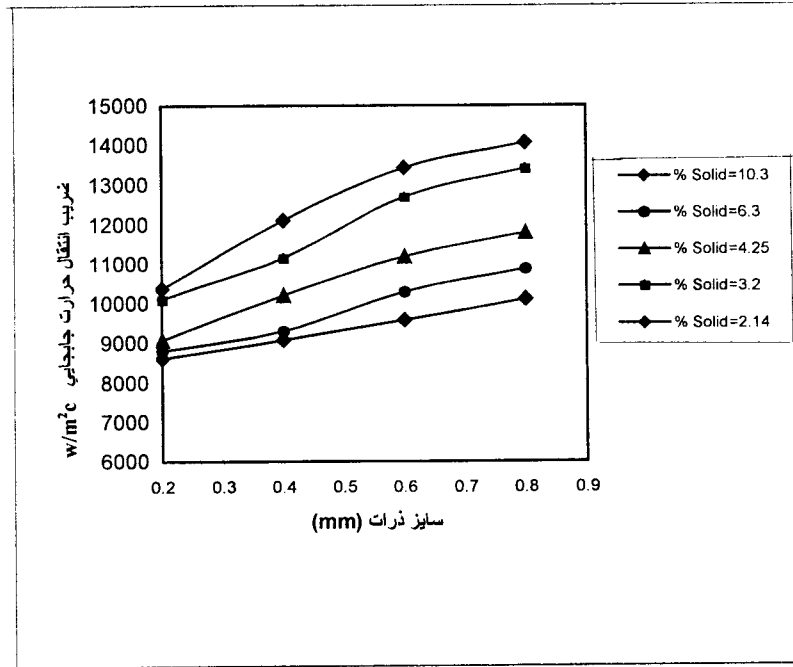
که باتوجه به نتایج آزمایشگاهی، وابستگی عدد بدون بعد ناسلت به هریک از گروههای بدون بعد به شکل زیر است:



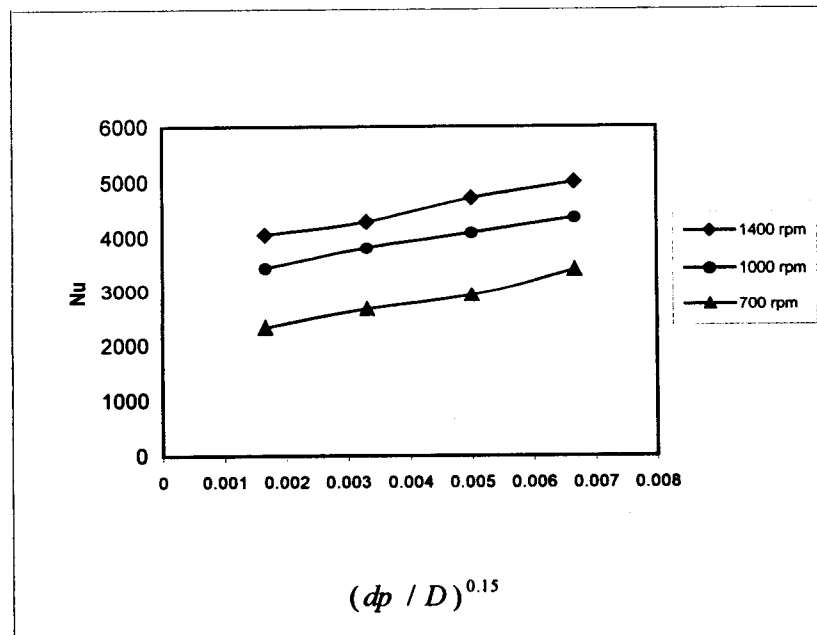
شکل ۲: ضریب انتقال حرارت جابجائی تجربی نسبت به تغییر سرعت دورانی همزن در ۶/۳ درصد وزنی از جامد.



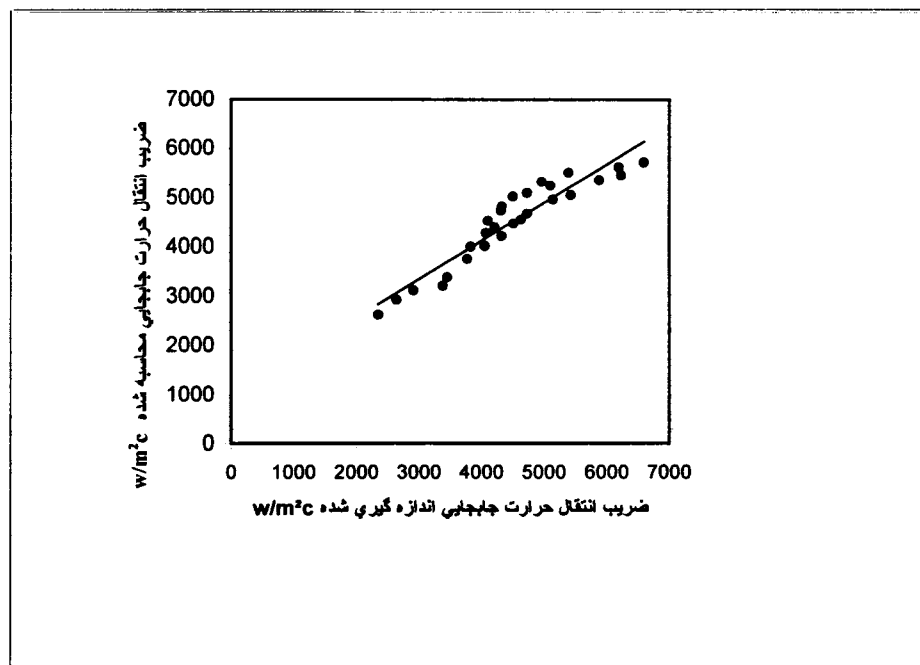
شکل ۳: ضریب انتقال حرارت جابجائی نسبت به درصد وزنی جامد در اندازه‌های مختلف با سرعت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه.



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.

آنچه واضح به نظر می‌رسد، تاثیر پارامترهای مهم مانند ρ ، μ ، C_p ، k و N بر روی مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت است. در واقع افزایش غلظت ذرات جامد به علت کاهش ظرفیت گرمایی ویژه منجر به کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی 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 آمده است که از طریق آن می‌توان تاثیر پارامترها را بر روی h مشاهده کرد. در شرایط کاملا یکسان ضریب انتقال حرارت با $d_p^{0.15}$ تغییر می‌کند.

تاثیر اندازه ذرات بر ضریب انتقال حرارت جابجایی

نمودار شکل (۴) تغییرات این ضریب را نسبت به اندازه ذرات در درصدهای وزنی متفاوت از جامد نشان می‌دهد. مطابق بانایج 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:

$$N_{Nu} \propto \left(\frac{d_p}{D}\right)^{0.15} \quad (۶)$$

k ثابت بدون بعد معادله که به خواص ترموفیزیکی سیستم وابسته است، معادل 0.185 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 می‌گردد حداکثر اختلاف در حدود ۱۰ درصد است.

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

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
 T' : قطر مخزن

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 - Ramasubramanian, 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*, Khannan, Delhi.
- 7 - MC Dounogh, R. J. (1992). *Mixing for the Process Industries*, Van Nostrand Reinhold.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

