

* کوروش شفيعی^۲

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی شیمی - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
 (تاریخ دریافت ۸۴/۱۰/۱۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۵/۹/۱۱، تاریخ تصویب ۸۶/۱/۲۵)

Vi Pr Re

$$Nu = 0.935 * Re^{0.62} * Pr^{0.33} * V_i^{1.82}$$

% /

: ضریب انتقال حرارت جابجایی - مخازن همزده - سیالات غیر نیوتنی - روابط تجربی - محلول

زانتان

ضروری است. لذا در چنین سیستم هایی عمل انتقال حرارت به منظور گرمایش و سرمایش از مهمترین عوامل جهت کنترل کیفی و کمی عملکرد این فرآیندها می باشد. در این تحقیق مطالعه تجربی برای دستیابی به یک رابطه مفید به منظور پیش بینی ضریب انتقال حرارت جابجایی یک سیال غیر نیوتنی در یک مخزن دو جداره مجهز به همزن مکانیکی و بافل غیر استاندارد انجام شده است.

آنچه عموماً در تحقیقات قبلی صورت گرفته است استفاده از سیالات بسیار ویسکوز به همراه همزنهای روبان ماریچی بوده است. در سال ۲۰۰۰ آقایان Devotta, Rai و Rao با استفاده از این نوع همزن و با استفاده از سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی توانستند رابطه ای جهت تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی در مخازن همزن دار ارائه نمایند [۱]. تنها فعالیتی که بر روی همزن با توربین زاویه دار و سیال غیر نیوتنی انجام گردیده است و در آن

سیستم سیالات غیر نیوتنی در مخازن مجهز به همزن مکانیکی در فرآیندهای شیمیایی کاربرد فراوان دارد. مواردی نظیر ساخت ژل های صنعتی، لاک های تجاری و انفجاری، راکتورهای واکنش های پلیمریزاسیون، بیوراکتورها و غیره مثالهایی از فرآیندهای مربوطه می باشند. گرمایش یا سرمایش محتویات مخازن همزده به منظورهای مختلفی صورت می گیرد. این انتقال حرارت می تواند جهت حفظ رژیم دمایی مشخصی در راکتورهای با واکنش گرمازا یا گرماگیر باشد، و یا بمنظور کاهش گرانروی جهت انتقال، اختلاط یا انحلال صورت گیرد. در فرآیند ساخت بسیاری از چسب ها، ژل های صنعتی، لاک های سلولزی یا انفجاری از سیستم گرمایش به منظور کاهش گرانروی جهت اختلاط مواد با یکدیگر و یکنواختی آنها استفاده می شود. در بعضی از راکتورهای واکنش پلیمریزاسیون گرمازا نیز انتقال حرارت بمنظور حفظ شرایط همدمای در واکنش و حفظ شرایط کمی و کیفی آن

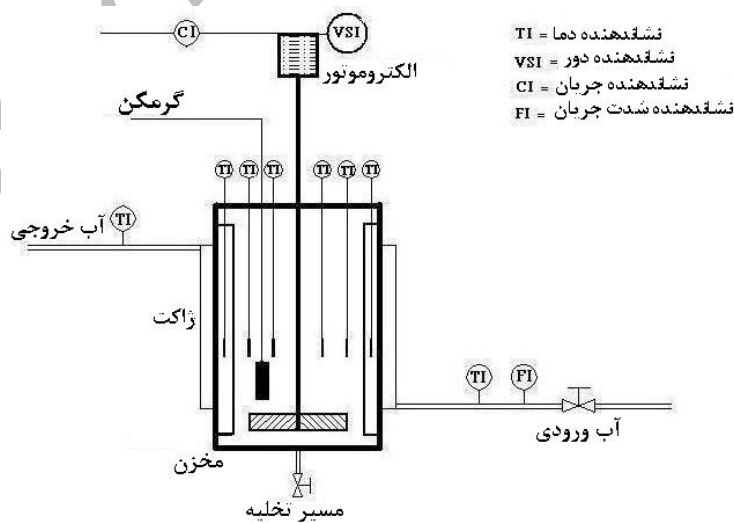
میلیمتر در نظر گرفته شده است. جداره بیرونی مخزن دوجداره بوسیله عایق حرارتی از نوع پشم شیشه پوشیده شده است. بکارگیری این عایق به منظور ایجاد شرایط بی‌دررو و تامین صحت و دقت در داده‌های آزمایشگاهی بوده است.

مخزن استوانه‌ای مجهز به همزن توربینی زاویه‌دار با تیغه‌های متصل شده می‌باشد. جهت چرخش همزن به گونه‌ای می‌باشد که مخلوط را در امتداد محور و به طرف بالا انتقال می‌دهد. تعداد تیغه‌های همزن چهار و زاویه قرارگیری تیغه‌ها نسبت به افق ۴۵ درجه است. قطر همزن، پهنا و ضخامت تیغه‌ها به ترتیب ۱۲، ۳٫۶ و ۰٫۶ سانتیمتر می‌باشند. مکان قرارگیری همزن درون مخزن در مرکز و در فاصله ۷ سانتیمتری از کف مخزن می‌باشد (شکل ۲). این همزن یکی از انواع همزن‌های محوری می‌باشد. اگر چه در این سیستم بخصوص یعنی اختلاط سیال غیرنیوتنی عموماً از همزن‌های لنگری جهت ایجاد آشفتگی در محتویات مخزن استفاده می‌شود و بسیاری از روابط تجربی ارائه شده برای استفاده از این نوع همزن می‌باشد ولی برای استفاده از تمام همزن‌ها با جریان محوری (با در نظر گرفتن شکل هندسی مخزن و میزان کمی گرانروی سیال و دیگر پارامترهای موثر) می‌تواند مفید باشد.

نیز بجای استفاده از دو جداره از لوله‌های خنک‌کن استفاده شده است، تحقیق Yu Shengyao و Wang Kai می‌باشد [۲]. این محققان با استفاده از مدل نرخ تنش بدست آمده از تحقیقات خود، و با بکارگیری انواع مختلف همزن‌ها و شرایط گرمایشی یا سرمایشی مختلف مانند دوجداره و لوله‌های مارپیچی اطلاعات ارزشمندی بدست آورده‌اند.

در تحقیق حاضر تلاش شده است تا با انتخاب سیستمی متفاوت رابطه جدیدی استخراج گردد. در این تحقیق، از محلول‌های زانتان با ترکیب درصد‌های متفاوت (۰٫۲، ۰٫۳ و ۰٫۵ درصد)، که محلول‌های غیر نیوتنی‌ای با گرانروی نسبتاً پائین می‌باشند و یک مخزن همزن‌دار با همزنی از نوع توربینی زاویه‌دار به همراه چهار عدد بافل عمودی غیر استاندارد استفاده شده است.

کلیه آزمایشات انتقال حرارت سیال غیر نیوتنی در مخزنی از جنس آهن گالوانیزه با قطر داخلی ۲۹ سانتیمتر و ارتفاع ۵۰ سانتیمتر انجام گرفته است. کف مخزن تخت و در وسط آن مجرای برای عبور محتویات داخل مخزن بعد از اتمام هر آزمایش در نظر گرفته شده است (شکل ۱). ارتفاع دوجداره بکار گرفته شده ۳۵ سانتی‌متر و فضای لازم برای عبور مایع خنک‌کننده از داخل آن ۸



دما با دمای دیواره قرائت شده در متوسط گیری مقایسه و مورد استفاده واقع می‌گردید. ترموکوپلهای بکار گرفته شده در این تجهیز طبق استاندارد – BSEN 60751 1996 کالیبره شده و دارای خطای $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ می‌باشد. به علت ثابت زمانی نسبتاً زیاد این ترموکوپلها و بررسی پدیده در شرایط پایا از نوسانات لحظه‌ای دماهای قرائت شده صرفنظر شده است.

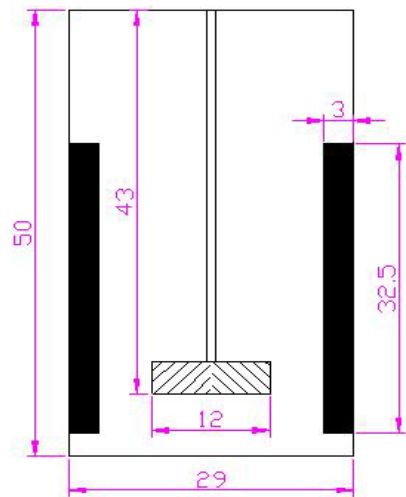
دماهای آب ورودی و خروجی جداره نیز توسط دو دماسنج جیوه ای کالیبره شده با دقت 0.1 درجه سانتی گراد اندازه گیری و به صورت دستی نیز ثبت می شدند. گرمایش مخلوط توسط یک گرمکن برقی لوله‌ای با توان 2000 وات انجام می گردید.

جهت انجام آزمایشات از مقدار مشخصی (حدود ۲۸ لیتر) از محلول های انتخاب شده (محلول زانتان با درصد های ترکیب مختلف) استفاده می‌شد. دور همزن موثر ترین عاملی است که بررسی می شود و لذا هر کدام از محلول های تهیه شده در ۵ دور مختلف (۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ دور بر دقیقه) مورد آزمایش قرار گرفتند و دمای نقاط مختلف سیال، دیواره مخزن، آب خنک کن ورودی و خروجی اندازه گیری می‌گردید. علت استفاده از زانتان و ساخت محلولهای آن خواص ویسکوالاستیک مناسب آن بود. این محلول ها با غلظتهای مختلف در داخل خود مخزن همزده تهیه می‌گردید. بدین گونه که با تعیین مقدار حجم مشخصی از آب و توزین پودر زانتان محلولهای ۰.۵٪، ۰.۳٪ و ۰.۲٪ وزنی از این ماده تهیه می‌گردید.

جهت تعیین خواص رئولوژیکی محلول های تهیه شده که بخش مهمی از محاسبات بود از یک دستگاه رنومتر MCR300 استفاده گردید. و رابطه توانی نرخ تنش و تنش برشی برای هر یک از محلول ها تهیه گردید. خلاصه نتایج مربوط به خواص رئولوژیکی این محلول ها در جدول (۱) آورده شده است.

الگوئی که در این تحقیق در نظر گرفته شد بر این مینا بود که تمامی گروه های بدون بعد به همان صورت سیالات نیوتنی نوشته شده و محاسبه گردند، تنها چگونگی محاسبه گرانروی تفاوت داشت. جهت محاسبه گرانروی ظاهری از رابطه ای که توسط Yu و Wang Kai [۲] Shengyao بدست آمده است و در رابطه ۱ ارائه شده است استفاده می شود (رابطه ۱).

توان لازم برای دوران همزن از یک الکتروموتور DC با قدرت یک اسب بخار تامین می گردد و سرعت همزن از صفر تا ۱۴۰۰ دور بر دقیقه قابل تغییر می باشد. سرعت دورانی همزن در صفحه نمایش دیجیتالی نشان داده می‌شود و جهت چرخش همزن نیز توسط کلید متصل به موتور الکتریکی قابل تنظیم و تغییر می‌باشد. بمنظور جلوگیری از تولید گردابه اجباری در سرعتهای چرخشی بالای همزن از اتصال عمودی و متقارن چهار بافل مستقیم غیر استاندارد به دیواره مخزن استفاده شده است. پهنای بافل ۳ سانتیمتر و فاصله انتهای بافل از کف مخزن ۲.۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. این فاصله برای حرکت توده سیال در کف مخزن مفید می باشد.



برای اندازه‌گیری دمای توده مخلوط و دیواره مخزن از پنج ترموکوپل که در مکانهای مختلف مخزن و دیواره قرار گرفته اند استفاده شده است و دماها در یک نمایشگر دیجیتالی مشخص می‌شوند. جهت اطمینان از دقت و صحت نتایج دما در نقاط مختلف، از یک ترمومتر Pt100 قابل حمل استفاده می‌گردید که عدد آن بر روی نشانگر دیجیتالی نمایش داده می شد. بدین گونه که علاوه بر ثبت نتایج نمایشگر دیجیتالی برای دیواره (۲) عدد از ترموکوپلها جهت اندازه گیری دمای دیواره به جداره مخزن چسبانده شده بودند) با استفاده از سوراخ موجود روی درب مخزن ترمومتر قابل حمل روی جداره مخزن چسبانده می شد و پس از اختصاص زمان مناسب جهت پایا شدن دما، دمای دیواره قرائت می شد. این

جدول ۱: خلاصه نتایج خواص رئولوژیکی محلولهای زانتان.

ردیف	Material	k	n
۱	Xanthan 0.5% solution	$k(pa.s) = 7.679 * 10^{-5} e^{\frac{2793}{T(k)}}$	$n = 0.39865$
۲	Xanthan 0.3% solution	$k(pa.s) = 3.272 * 10^{-4} e^{\frac{2270}{T(k)}}$	$n = 0.41015$
۳	Xanthan 0.2% solution	$k(pa.s) = 5.893 * 10^{-5} e^{\frac{2440}{T(k)}}$	$n = 0.5118$

$$q = h.A.\Delta T$$

(۵)

که ΔT اختلاف بین دمای توده مخلوط و سطح داخلی دیواره مخزن می باشد. دمای توده مخلوط از متوسط حسابی دماهای ثبت شده در حالت پایا محاسبه می شود. A سطح داخلی انتقال حرارت بر حسب m^2 و h ضریب انتقال حرارت جابجایی مخلوط داخل مخزن با سطح داخلی بر حسب $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ می باشد. مقدار حرارتی که به آب جاری در جداره منتقل می شود از رابطه ۶ محاسبه می گردد:

$$q = w_j C_p (T_{j0} - T_{ji})$$

(۶)

که w_j دبی جرمی آب ورودی به ژاکت، C_p ظرفیت گرمایی ویژه متوسط آب می باشد. در حالت پایا دو معادله مذکور برابر می باشند و مقدار h با توجه به این موازنه حرارتی تعیین می گردد. با تغییر مقادیر پارامترهای سرعت دوران همزن و غلظت سیال غیر نیوتنی مقادیر مختلف h و تاثیر این پارامترها بر روی آن مشخص می گردد.

تاثیر دور همزن

با توجه به انتخاب دور های ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ دور بر دقیقه برای همزن اعداد رینولدزی از حدود ۳۰۰ تا حدود ۶۶۰۰۰ بدست می آید که البته این ارقام متاثر از تغییرات گرانروی محلولهای مختلف نیز می باشد. افزایش عدد رینولدز (یا دور همزن) باعث افزایش عدد ناسلت (یا ضریب انتقال حرارت) می شود.

$$\mu_a = K 0.4^{(n-1)/n} N^{[2-f(2-n)](n-1)/n}$$

(۱)

از رابطه ۱ می توان برای تعریف اعداد بدون بعد جهت معادله انتقال حرارت استفاده نمود:

$$Re^* = \frac{d^2 N \rho}{\mu_a} = \frac{d^2 N \rho}{K} 0.4^{(n-1)/n} N^{[2-f(2-n)](n-1)/n}$$

(۲)

$$Pr^* = \frac{C_p \mu_a}{k} = \frac{C_p K}{k} 0.4^{(n-1)/n} N^{[2-f(2-n)](n-1)/n}$$

(۳)

با داشتن روابط فوق محاسبه گروه های بدون بعد و انجام محاسبات دیگر بسیار ساده خواهد بود. الگویی که برای بدست آوردن رابطه تجربی نهایی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت به صورت رابطه ۴ بود.

$$Nu = C * Re^a * Pr^b * Vi^d$$

(۴)

که در آن Vi نسبت گرانروی در دمای توده سیال به گرانروی در دمای دیواره داخلی مخزن یا همان عدد تصحیح گرانروی می باشد.

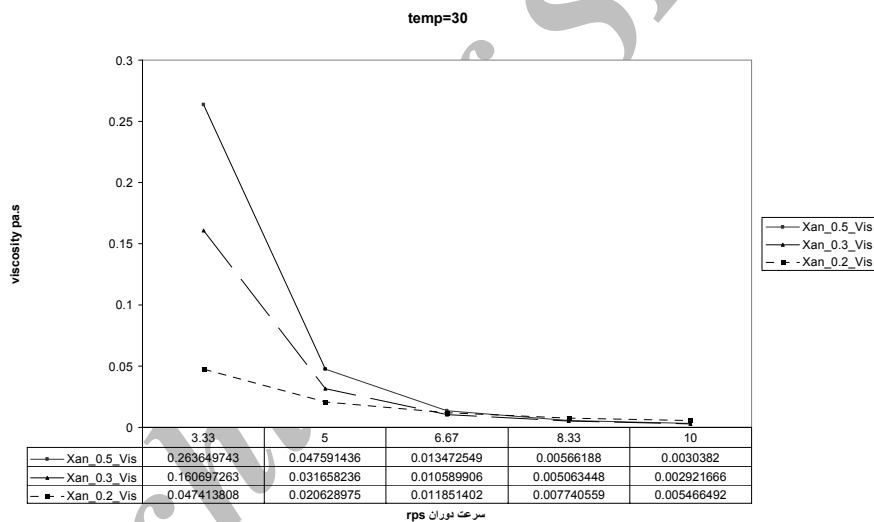
بررسی نتایج آزمایشگاهی

کلیه آزمایشات انتقال حرارت در حالت پایا به همراه حرارت فراهم شده توسط گرمکن الکتریکی برای مخلوط داخل مخزن در تعادل با آب سرد جاری در جداره انجام می شود.

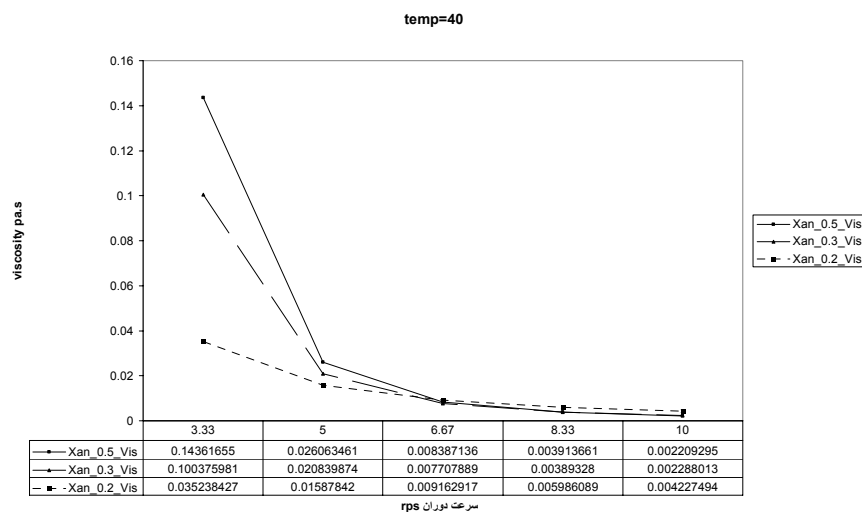
برای محاسبه ضریب انتقال حرارت از داده های تجربی، از موازنه حرارتی بین مخلوط داخل مخزن و آب خنک کننده جاری در جداره در حالت پایا استفاده می شود. مقدار حرارتی که از مخلوط داخل مخزن از طریق جابجایی اجباری به سیال درون جداره منتقل می شود از رابطه ۵ محاسبه می شود:

منحنی ها دیده می شود گرانیوی محلول زانتان ۰.۵٪ اگر چه در دور های دوران پائین (یا نرخ تنش پائین) بیشتر از محلول زانتان ۰.۳٪ و این نیز بزرگتر از محلول زانتان ۰.۲٪ می باشد ، ولی در دورهای بالای همزن (یا نرخ تنش بالا) موضوع کاملا فرق می کند . این پدیده بدلیل رابطه توانی گرانیوی و وابستگی آن به نرخ تنش می باشد و این تغییرات تاثیر خود را در مقادیر ضریب انتقال حرارت محاسبه شده و یا عدد ناسلت محاسباتی خود را نشان داده است. تاثیر دور همزن بر مقدار ضریب انتقال حرارت جابجای اجباری در جدول (۲) آمده است. نمودارهای داده های بدست آمده که نشانگر افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش دور همزن می باشد در منحنی های (۳)، (۴) و (۵) ارائه است .

تنها نکته ای که قابل توجه می باشد تفاوت رفتار سیالات غیر نیوتنی با سیالات نیوتنی می باشد. از آنجایی که گرانیوی سیالات غیر نیوتنی وابسته به نرخ تنش یا دور همزن و نیز وابسته به ضریب و توان رابطه توانی است، لذا عدد گرانیوی، عددی چندان قابل پیش بینی نخواهد بود. در رابطه ۱ مشاهده می شود که گرانیوی تابعیتی پیچیده از N دور همزن دارد. و علاوه بر این در رابطه ۴ وابستگی h به گرانیوی غیرخطی و لذا در مجموع تغییرات گرانیوی با سرعت دوران و دما از پیچیدگی خاصی برخوردار است. جهت مشاهده بهتر رفتار گرانیوی در مورد سه محلول انتخاب شده منحنی های (۱) و (۲) که نشانگر تغییرات گرانیوی هر کدام از آنها با دور همزن های انتخاب شده، در دمای ثابت می باشد ارائه شده است. همانگونه که در



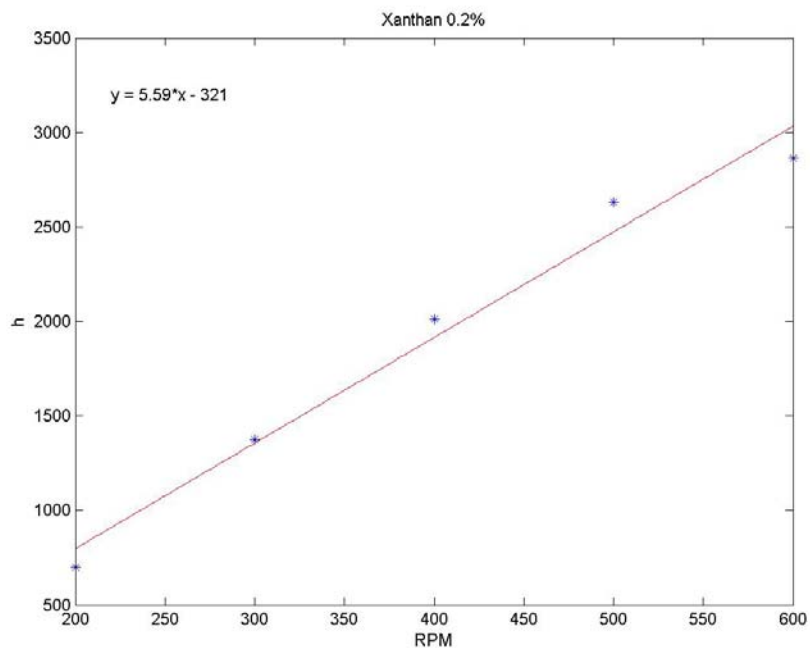
شکل ۱: تغییرات گرانیوی با دور همزن برای هر سه محلول در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد.



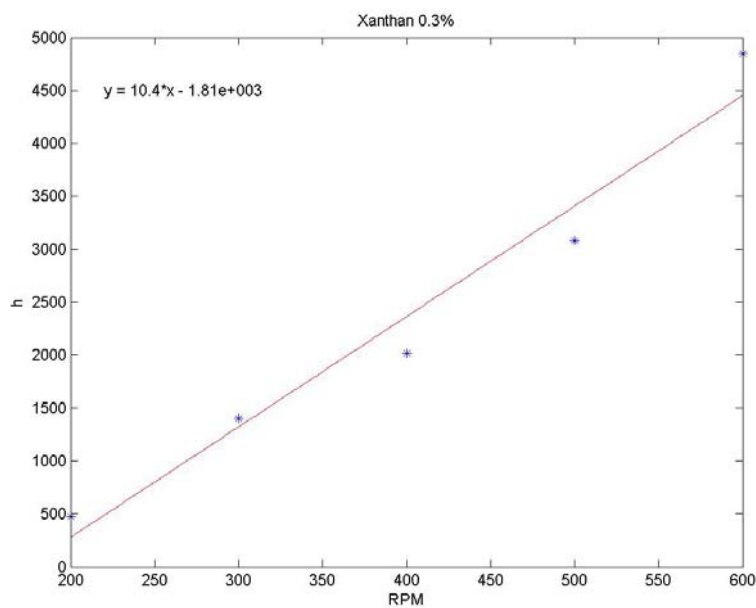
شکل ۲: تغییرات گرانیوی با دور همزن برای هر سه محلول در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد.

جدول ۲: ضریب انتقال حرارت محاسبه شده برای محلول ها در دور همزن های مختلف.

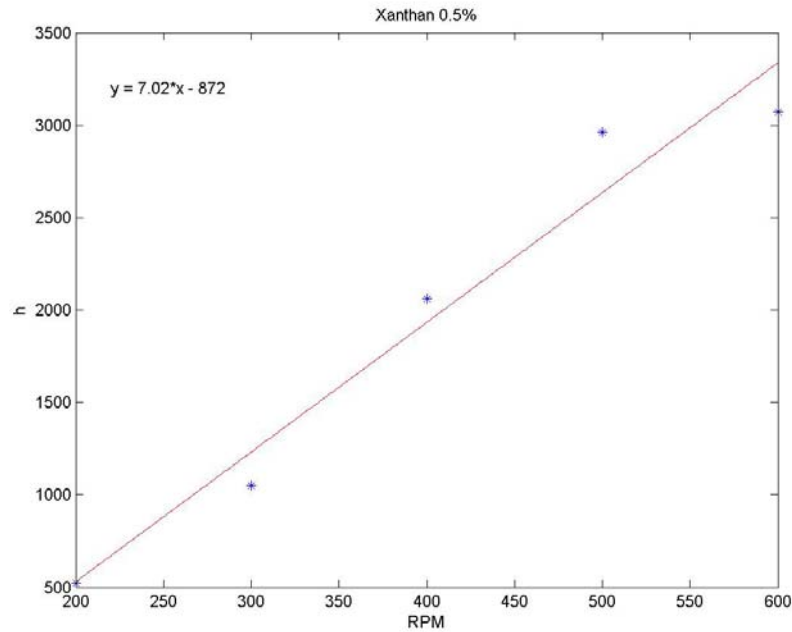
200	300	400	500	600	RPM	Xanthan0.2%
697.38	1371.9	2012.1	2629.5	2863.1	$h\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$	
200	300	400	500	600	RPM	Xanthan0.3%
473.44	1402.4	2018.7	3081.5	4847.4	$h\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$	
200	300	400	500	600	RPM	Xanthan0.5%
521.99	1049.8	2062.6	2963.3	3073.1	$h\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$	



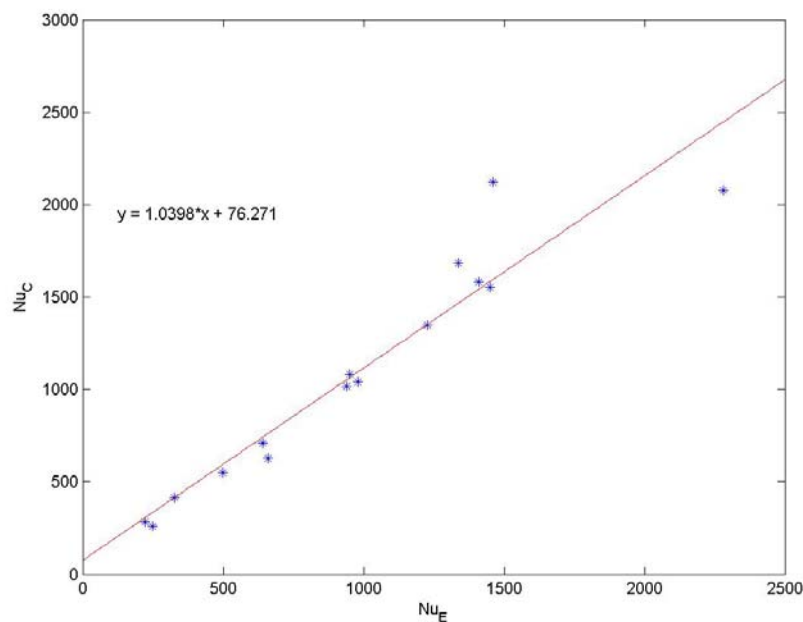
شکل ۳: ضریب انتقال حرارت محاسبه شده برای محلول زانتان ۰.۲٪ در دور همزن های مختلف.



شکل ۴: ضریب انتقال حرارت محاسبه شده برای محلول زانتان ۰.۳٪ در دور همزن های مختلف.



شکل ۵: ضریب انتقال حرارت محاسبه شده برای محلول زانتان ۰,۵٪ در دور همزن های مختلف.



شکل ۶: مقایسه مقادیر عدد ناسلت تجربی با مقادیر محاسبه شده آن از معادله ۷.

ناسلت در سیستم سیالات غیر نیوتنی (محلولهای زانتال) فراهم گردید بطوریکه تاثیر هر یک از پارامترهای مورد بحث بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی در رابطه نهایی ارائه شده است. این رابطه با استفاده از روش حداقل مجموع مربعات خطاها و کمک گرفتن از نرم افزار Mathlab 6.5 بدست آمده است. در مراجع مختلف توان گروه های بدون بعد بصورت تجربی ثابت فرض شده است [۳-۷]. در این تحقیق با بررسی کلیه حالت های ممکن در ثابت نگاه

نتیجه گیری

تاثیر سرعت دوران همزن و تغییرات دمایی حاصل از گرمایش یا سرمایش که منجر به تغییر در خواص رئولوژیکی سیال ویسکوالاستیک می شود در آزمایشات و مقادیر ضریب انتقال حرارت دیده شده است. با استفاده از نتایج حاصل از آزمایشات و ارتباط داده های تجربی بدست آمده با یکدیگر رابطه ای برای عدد

فهرست علائم

N	: دور همزن (r/sec)
D, d	: قطر همزن
T, t	: قطر مخزن
C, Hi	: فاصله همزن از کف مخزن
L	: طول تیغه همزن
Pr	: عدد پرانتل
Re	: عدد رینولدز
Vi	: نسبت گرانیوی در دمای توده به دمای سطح داخلی دیواره
Nu	: عدد ناسلت
h	: ضریب انتقال حرارت جابجایی
n	: توان رابطه توانی
K	: ضریب رابطه توانی
μ_a	: گرانیوی ظاهری
μ	: گرانیوی
μ_w	: گرانیوی در دمای دیواره
ρ	: چگالی
C_p	: ظرفیت حرارتی
k	: ضریب هدایت حرارتی
γ	: نرخ تنش
w_j	: دبی جرمی

داشتن بعضی از ضرائب رابطه و متغیر فرض کردن آن بهترین تطبیق داده ها در حالتی دیده شد که توان گروه بدون بعد Pr برابر ۰,۳۳، فرض شود. با در نظر گرفتن این موضوع رابطه ۷ بعنوان رابطه نهایی تعیین گردید:

$$Nu = 0.935 Re^{0.62} Pr^{0.33} Vi^{1.82} \quad (7)$$

رابطه فوق انطباق خوبی با داده های تجربی بدست آمده دارد. میزان این انطباق ۹۰,۷۸٪ می باشد. مقایسه بین مقادیر عدد ناسلت بدست آمده از آزمایشات و مقادیر محاسبه شده از رابطه تجربی فوق در شکل (۶) نمایش داده شده است. محدوده عدد رینولدز معتبر برای این رابطه از ۳۰۰ تا ۶۶۰۰۰ می باشد. همانگونه که مشاهده می گردد برای توان عدد گرانیوی برخلاف مقادیر معمول ۰/۱۴ یا ۰/۱۸ عدد ۱/۸۲ بدست آورده شده است. این امر مشخصاً وابستگی بیشتر ضریب انتقال حرارت به ویسکوزیته سیال و تغییرات آنرا بیان می کند. در پایان لازم به ذکر است که با توجه به دقت ترموکوپلها و سایر تجهیزات اندازه گیری به کار گرفته شده میزان خطای یافته های تجربی در حد $\pm 5\%$ تخمین زده می شود.

مراجع

- 1 - Rai, C. L., Devotta, I. and Rao, P.G. (2000). *J. Chem. Eng.*, Vol. 79, PP. 73-77.
- 2 - Wang Kai and Yu Shengyao. (1989). *J. Chem. Eng. Sci.*, Vol. 44, PP. 33-40.
- 3 - Ayazi Shamlou, P. and Edwards, M. F. (1986). *J. Chem Engng Sci.*, Vol. 8, PP. 1957-1986.
- 4 - Ishibashi, K. and Yamanaka, A. (1972). *J. Chem Engng, Jap.* Vol. 12, PP. 230-236.
- 5 - Bourne, J. R. (1981). *J. Chem. Eng. Sci.*, Vol. 36, PP. 347-354.
- 6 - Mitzushina, T.R. et al. (1970). *Kagaku kogaku*, Vol. 34, PP.1205.
- 7 - Pollard, J. and Kantyaka, T. A. (1969). *T. Instn. Chem Eng.*, Vol. 47, PP. T21-T27.