^{*} کوروش شفیعی^۲ ^۱دانشیار دانشکده مهندسی شیمی - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران ^۲دانش 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

 $Nu = 0.935 * \text{Re}^{0.62} * \text{Pr}^{0.33} * Vi^{1.82}$

: ضريب انتقال حرارت جابجايي - مخازن همزده - سيالات غير نيوتني - روابط تجربي - محلول

% /

زانتان

ضروری است . لذا در چنین سیستم ه ایی 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 عموما در تحقیقات قبلی صورت گرفته است استفاده از سیالات بسیار ویسکوز به همراه همزنهای روبان مارپیچی بوده است . در سال ۲۰۰۰ آقایان Devotta ، Rai از سیالات بسیار ویسکوز به محراه همزنهای روبان مارپیچی بوده است . در سال ۲۰۰۰ آقایان Rai ، میالات مارپیچی 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 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 واکنشهای 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 همدما در واکنش و حفظ شرایط کمی و کیفی آن

نیز بجای استفاده از دو جداره از لوله های خنک کن استفاده شده است، تحقیق Wang Kai و Yu Shengyao می باشد [7]. این محققان با استفاده از مدل نرخ تنش بدست آمده از تحقیقات خود، و با بکار گیری انواع مختلف همزن ها 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 محلول های زانتان با ترکیب درصد های متفاوت (۰۰, ۰ ۳,۰ و ۵,۰ درصد) ، که محلول های غیر نیوتنی ای با گرانروی نسبتا پائین می باشند و یک مخزن همزن دار با همزنی از نوع توربینی زاویه دار 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 مجرایی برای عبور محتویات داخل مخزن بعد از اتمام هر آزمایش در نظر گرفته شده است (شکل ۱). ارتفاع دوجداره بکار گرفته شده ۳۵ سانتی متر و فضای لازم برای عبور مایع خنک کننده از داخل آن ۸

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 داده های آزمایشگاهی بوده است.

مخزن استوانه ای مجهز به همزن توربینی زاویهدار با تیغه های متصل شده می باشد. جهت چرخش همزن به گونه ای می باشد که مخلوط را در امتداد محور و به طرف بالا انتقال می دهد . تعداد تیغه های همزن چهار و زاویه قـرار گیری تیغه ها نسبت به افق ۴۵ درجه است . قطر همزن ، پهنا و ضخامت تيغه ها به ترتيب ۱۲ ، ۳٫۶ و ۰٫۶ سانتیمتر میباشند . مکان قرار گیری همزن درون مخزن در مرکز و در فاصله ۷ سانتیمتری از کف مخزن می باشد (شکل ۲). این همزن یکی از انواع همزنهای محوری می باشد . اگر چه در این سیستم بخصوص یعنی اختلاط سیال غیرنیوتنی عموما از همزن های لنگری جهت ایجاد آشفتگی در محتویات مخزن استفاده می شود و بسیاری از روابط تجربی ارائه شده برای استفاده از این نوع همزن می باشد ولی برای استفاده از تمام همزن ها با جریان محوری (با در نظر گرفتن شکل هندسی مخزن و میزان کمی گرائروی سیال و دیگر پارامترهای موثر) می تواند مفىد باشد



:

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 اندازه گیری 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 imitگر دیجیتالی نمایش داده می گردید 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

دما با دمای دیواره قرائت شده در متوسط گیری مقایسه و مورد استفاده واقع می گردید. ترمو کوپلهای بکار گرفته شده در این تجهیز طبق استاندارد – 60751 BSEN 1996 کالیبره شده و دارای خطای C⁰L ± می باشد. به علت ثابت زمانی نسبتاً زیاد این ترمو کوپلها 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 ۰/۱ درجه سانتی گراد اندازهگیری و به صورت دستی نیز ثبت می شدند . گرمایش مخلوط توسط یک گرمکن برقی لولهای با توان ۲۰۰۰ 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، م10 و ۶۰۰ دور بر دقیقه) مورد آزمایش قرار گرفتند و دمای نقاط مختلف سیال ، دیواره مخزن ، آب خنک کن ورودی و خروجی اندازه گیری می گردید. 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 می گردید. بدین گونه که با تعیین مقدار حجم مشخصی از آب و توزین پودر زانتان محلولهای ۵٫۰٪ ، ۲٫۰٪ و ۲٫۰٪ وزنی از این ماده تهیه می گردید.

جهت تعیین خواص رئولوژیکی محلول های تهیه شده که بخش مهمی از محاسبات بود از یک دستگاه رئومتر 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 مبنا 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 Wang Kai و Yu گرانروی ظاهری از رابطه ای که توسط Kai ارائه شده است استفاده می شود (رابطه ۱).

جدول ۲۰ کارصه مایج خواص رفونوریکی محفولهای رامان.							
رديف	Material	k	n				
١	Xanthan 0.5% solution	$k(pa.s) = 7.679 * 10^{-5} e^{\frac{2793}{T(k)}}$	<i>n</i> = 0.39865				
٢	Xanthan 0.3% solution	$k(pa.s) = 3.272 * 10^{-4} e^{\frac{2270}{T(k)}}$	<i>n</i> = 0.41015				
٣	Xanthan 0.2% solution	$k(pa.s) = 5.893 * 10^{-5} e^{\frac{2440}{T(k)}}$	<i>n</i> = 0.5118				

جدول ۱: خلاصه نتایج خواص رئولوژیکی محلولهای زانتان

 $q = h.A.\Delta T$

(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 . حسابی دماهای ثبت شده در حالت پایا محاسبه می شود . A سطح داخلی انتقال حرارت بر حسب m^2 و h ضریب iteration of the end of the end of the end of the end iteration of the end of the end of the end of the end iteration of the end of the end of the end of the end iteration of the end of the end of the end of the end iteration of the end of the end of the end of the end and the end of the en

مقادیر پارامترهای سرعت دوران همزن و غلظت سیال غیر نیوتنی مقادیر مختلف h و تاثیر این پارامترها بر روی آن مشخص می گردد.

تاثير دور همزن

با توجه به انتخاب دور های ۲۰۰ ، ۳۰۰ ، ۴۰۰ ، ۴۰۰ ، ۵۰۰ و ۶۰۰ دور بر دقیقه برای همزن اعداد رینولدزی از حدود ۳۰۰ تا حدود ۶۶۰۰۰ بدست میآید که البته این ارقام متاثر از تغییرات گرانروی محلولهای مختلف نیز میباشد.

افزایش عدد رینولدز (یا دور همزن) باعث افزایش عدد ناسلت (یا ضریب انتقال حرارت) می شود .

$$\mu_a = K0.4^{(n-1)/n} N^{[2-f(2-n)](n-1)/n}$$

(1)

از رابطه ۱ می توان برای تعریف اعداد بدون بعد جهت معادله انتقال حرارت استفاده نمود : $\operatorname{Re}^* = \frac{d^2 N \rho}{d^2 N \rho} = \frac{d^2 N \rho}{2 (4^{(n-1)/n} N^{[2-f(2-n)](n-1)/n})}$

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

(۳)

(٢)

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.

$$Nu = C * \mathrm{Re}^{a} * \mathrm{Pr}^{b} * Vi^{d}$$

(۴)

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

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 گرانروی محلول زانتان ۵, ۰ / اگر چه در دور های دوران پائین (یا نرخ تنش پائین) بیشتر از محلول زانتان ۲, ۰ / و این نیز بزرگتر از محلول زانتان ۲, ۰ / می باشد ، ولی در دورهای بالای همزن (یا نرخ تنش بالا) موضوع کاملا فرق می کند . این پدیده بدلیل رابطه توانی گرانروی 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 نمان داده است. تاثیر دور همزن بر مقدار ضریب انتقال مودارت 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 گرانروی سیالات غیر نیوتنی وابسته به نرخ تنش یا دور همزن و نیز وابسته به ضریب و توان رابطه توانی است، لذا عدد گرانروی، عددی چندان قابل پیش بینی نخواهد بود. در رابطه ۱ مشاهده می شود که گرانروی تابعیتی پیچیده از N دور همزن دارد. و علاوه بر این در رابطه ۴ وابستگی از N دور همزن دارد. و علاوه بر این در رابطه ۴ وابستگی با سرعت دوران و دما از پیچیدگی خاصی برخوردار است. جهت مشاهده بهتر رفتار گرانروی در مورد سه محلول انتخاب شده منحنیهای (۱) و (۲) که نشانگر تغییرات گرانروی هر کدام از آنها با دور همزنهای انتخاب شده، در دمای ثابت می باشد ارائه شده است. همانگونه که در



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

	0					•
200	300	400	500	600	RPM	
697.38	1371.9	2012.1	2629.5	2863.1	$h\left(\frac{W}{m^2 \circ K}\right)$	Xanthan0.2%
200	300	400	500	600	RPM	
473.44	1402.4	2018.7	3081.5	4847.4	$h\left(\frac{W}{m^2 \circ K}\right)$	Xanthan0.3%
200	300	400	500	600	RPM	
521.99	1049.8	2062.6	2963.3	3073.1	$h\left(\frac{W}{m^2 \circ K}\right)$	Xanthan0.5%

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



شکل ۳ : ضریب انتقال حرارت محاسبه شده برای محلول زانتان ۲۰۰۰ 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 ۵,۰٪ در دور همزن های مختلف.



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

نتيجه گيرى

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

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 6.5 Mathlab 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

ىلائم	فهرست ء	داشتن بعضي از ضرائب رابطه و متغير فرض كردن أن
: دور همزن (r/sec)	Ν	بهترین تطبیق داده ها در حالتی دیده شد که توان گروه
: قطر همزن	D,d	بدون بعد Pr برابر ۰٫۳۳ فرض شود . با درنظر گرفتن این
: قطر مخزن	T,t	موضوع رابطه ۷ بعنوان رابطه نهایی تعیین گردید :
: فاصله همزن از کف مخزن	C , Hi	$Nu = 0.935 \text{ Re}^{0.62} \text{ Pr}^{0.33} Vi^{1.82}$
: طول تيغه همزن	L	(Y)
: عدد پرانتل	Pr	رابطه فوق انطباق خوبی با داده های تجربی بدست آمده
: عدد رينولدز	Re	دارد . میزان این انطباق ۹۰٫۷۸٪ می باشد . مقایسه
: نسبت گرانروی در دمای توده به دمای سطح	Vi	بین مقادیر عدد ناسلت بدست آمده از آزمایشات و
داخلى ديواره		مقادیر محاسبه شده از رابطه تجربی فوق در شکل (۶)
: عدد ناسلت	Nu	نمایش داده شده است . محدوده عدد رینولدز معتبر
: ضريب انتقال حرارت جابجايي	h	برای این رابطه از ۳۰۰ تا ۶۶٬۰۰۰ میباشد . همانگونه که
: توان رابطه توانی	n	مشاهده می گردد برای توان عدد گرانروی برخلاف
: ضریب رابطه توانی	Κ	مقادیر معمول ۰/۱۴ یا ۰/۱۸ عدد ۱/۸۲ بدست آورده
: گرانروی ظاهری	μ_{a}	شده است. این امرمشخصاً وابستگی بیشتر ضریب انتقال
: گرانروی	μ	حرارت به ویسکوزیته سیال و تعییرات آنرا بیان می کند.
: گرانروی در دمای دیواره	μ_w	در پایان لازم به ذکر است که با توجه به دقت
: چگالی	ρ	ترموکوپلها و سایر تجهیزات اندازه گیری به کار گرفته
: ظرفیت حرارتی	C_{n}	شده میزان خطای یافتههای تجربی در حد 5%±
: ضربب هدایت جرارتی	k	تخمينزده مىشود.
: ن خ تنش	Y	
: دير جامن	W :	
	J	

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.