دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی شیمی

بررسی تجربی تأثیر میدان‌های خارجی(الکتریکی و مغناطیسی) بر ویسکوزیته نانوسیال مغناطیسی Fe_3O_4/EG

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

الهه منجمی رارانی

اساتید راهنما

دکتر نسرین اعتصامی

دکتر محسن نصر اصفهانی

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی خانم الهه منجمی زارانی

تحت عنوان

بررسی تجربی تأثیر میدان‌های خارجی(الکتریکی و مغناطیسی) بر ویسکوزیته نانوسیال مغناطیسی Fe_3O_4/EG

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۱۰ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنما — دکتر نسرین اختصاصی

۲- استاد راهنما — دکتر محسن نصر اصفهانی

۳- استاد داور — دکتر فرهاد مهرپرور

۴- استاد داور — دکتر مسعود حق شناس فرد

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده — دکتر حمیدرضا زیلویی

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

آنانکه شادی‌هایم را علت بوده و غم‌هایم را شریک

درود و سپاس آنکه اجازه داد بودنم را
تا باشم، بیابم، بفهمم و بفهمانم....
درود وسپاس یکتا پروردگار مهربانم را
و
درود و سپاس هر آنکه آموخت مرا حرفی، سخنی و نکته‌ای
از آن اولین روز تحصیل تا امروز که خاتمه می‌دهم فصلی از آموختن را
باشد که شروعی باشد برای فصل تازه‌ای از دانستن

از پدر و مادر عزیزم که عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان بهترین پشتیبان من بوده و هست، بینهایت سپاسگزارم.

از اساتید گرامی، سرکار خانم دکتر نسرین اعتصامی و جناب آقای دکتر محسن نصر اصفهانی که در تمامی مراحل انجام این تحقیق همراه من بوده و مرا از راهنمایی‌های ارزشمند خود بهره مند کردند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از اساتید محترم، جناب آقای دکتر مهربانی و جناب آقای دکتر حق شناس فرد که مطالعه و داوری این تحقیق را بر عهده گرفتند، تشکر می کنم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
فهرست شکل‌ها ..... ده
فهرست جداول ..... دوازده
فهرست علایم اختصاری ..... سیزده
چکیده ۱

فصل اول: مقدمه
مقدمه ۲

فصل دوم: بیان مفاهیم و مروری بر پژوهش‌های انجام شده
۲-۱ مقدمه ۶
۲-۲ ویسکوزیته ۶
۲-۳ نانوسیال ۸
۲-۳-۱ تهیه نانوسیال ۱۰
۲-۳-۲ ویسکوزیته نانوسیال ۱۲
۲-۳-۳ مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه ویسکوزیته نانوسیال ۱۴
۲-۴ نانوسیال مغناطیسی ۲۰
۲-۵ میدان‌های خارجی ۲۲
۲-۵-۱ میدان الکتریکی ۲۲
۲-۵-۲ مروری بر مطالعات در زمینه اثر میدان الکتریکی روی ویسکوزیته نانوسیال ۲۶
۲-۵-۳ میدان مغناطیسی ۳۲
۲-۵-۴ مروری بر مطالعات در زمینه اثر میدان مغناطیسی روی ویسکوزیته نانوسیال ۳۷
۲-۶ هدف از انجام این تحقیق ۴۲

فصل سوم: دستگاه و نحوه انجام آزمایش
۳-۱ مقدمه ۴۴
۳-۲ تجهیزات مورد استفاده ۴۴
۳-۳ تهیه نانوسیال ۴۹
۳-۴ روش انجام آزمایش ۵۰
۳-۵ نحوه اندازه‌گیری پارامترها ۵۱
۳-۶ نحوه انجام محاسبات ۵۱

فصل چهارم: بحث و بررسی نتایج

۴- ۱ مقدمه ۵۳
۴- ۲ بررسی صحت عملکرد دستگاه ۵۳
۴-۳ بررسی رفتار رئولوژیکی نانوسیالات ۵۴
۴-۴ اثر غلظت نانوذرات روی ویسکوزیته ۵۵
۴-۵ اثر میدان الکتریکی روی ویسکوزیته ۵۶
۴-۶ اثر میدان مغناطیسی روی ویسکوزیته ۶۵
۴-۷ بررسی اثر دما بر ویسکوزیته نانوسیال و سیا ل پایه در حضور و در غیاب میدان‌های خارجی ۷۰

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه‌گیری ۷۴
۵-۲ پیشنهادات ۷۵

پیوست: آنالیز خطا

۱ مقدمه ۷۶
۲ محاسبه خطا ۷۷
۲-۱ محاسبه خطا در اندازه‌گیری پارامترها ۷۷
۲-۲ خطا در کمیت‌های محاسبه شده ۷۸

مراجع ۸۰

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: نمودار ویسکوزیته بر حسب دما برای سیالات مختلف ۸
شکل ۲-۲: ویسکوزیته نانوسیالات SiC در آب با غلظت ۴/۱ درصد حجمی با اندازه ذرات مختلف ۱۸
شکل ۲-۳: ویسکوزیته نسبی نانوسیالات SiC در مخلوط آب و اتیلن‌گلیکول با اندازه ذرات متفاوت بر حسب دما ۱۸
شکل ۲-۴: اثر (الف) اندازه ذرات، و (ب) کسر جرمی نانوذرات روی ویسکوزیته نانوسیال در نرخ برش‌های مختلف ۱۹
شکل ۲-۵: کاربرد سیال مغناطیسی در (الف) خنک کردن بلندگو، (ب) درزگیری محور چرخشی ۲۱
شکل ۲-۶: نمایش تجمع نانوذرات مغناطیسی.....۲۱
شکل۲-۷: پدیده باد کرونا ۲۳
شکل ۲-۸: شکل شماتیک آزمایش استوارتز ۲۵
شکل ۲-۹: غیریکنواختی توزیع میدان الکتریکی.....۲۵
شکل ۲-۱۰: پدیده استخراج مایع ۲۶
شکل ۲-۱۱: سوسپانسیون در جریان برشی ۲۸
شکل ۲-۱۲: نمایش سیستم نانوذرات تحت میدان الکتریکی AC ۳۰
شکل ۲-۱۳: توزیع سرعت ذرات، (الف) تحت میدان الکتریکی، (ب) بدون میدان الکتریکی.....۳۱
شکل ۲-۱۴: حرکت نانوذرات در سیال تحت میدان الکتریکی متناوب.....۳۲
شکل ۲-۱۵: چرخش نانوذرات تحت میدان مغناطیسی برای قرار گرفتن در جهت میدان ۳۳
شکل ۲-۱۶: تغییر ساختار نانوذرات با افزایش قدرت میدان مغناطیسی ۳۴
شکل ۲-۱۷: تشکیل ساختار زنجیره‌ای نانوذرات در جهت میدان مغناطیسی.....۳۵
شکل ۲-۱۸: چرخش ذره مغناطیسی در سیال تحت نیروی برشی.....۳۶
شکل ۲-۱۹: تأثیر میدان خارجی در ایجاد ویسکوزیته چرخشی ۳۷
شکل ۲-۲۰: ویسکومتر لوله موئین و میدان مغناطیسی عمود بر جهت جریان.....۳۸
شکل۲-۲۱: افزایش ویسکوزیته با افزایش کسر حجمی ذرات آهن در حضور و در غیاب میدان مغناطیسی ۳۹
شکل ۲-۲۲: وابستگی ویسکوزیته سیالات مغناطیسی به میدان مغناطیسی ۴۰
شکل ۲-۲۳: تغییرات ویسکوزیته سیال مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی ۴۱
شکل ۲-۲۴: تغییرات ویسکوزیته نسبی نانوسیال مغناطیسی با افزایش شدت میدان مغناطیسی موازی با گرادیان دما ۴۲
شکل ۳-۱: شکل شماتیک ویسکومتر لوله موئین.....۴۵
شکل ۳-۲: الکترود مسی برای ایجاد میدان الکتریکی ۴۵
شکل ۳-۳: ترانسفورماتور.....۴۶
شکل ۳-۴: منبع تغذیه ولتاژ بالا و یکسوکننده جریان ۴۶
شکل ۳- ۵: نمایش نحوه اعمال میدان الکتریکی ۴۷
شکل ۳-۶: مولتی‌متر و پروب ولتاژ بالا ۴۷
شکل ۳-۷: بلوک‌های آهنربا ۴۸

شکل ۳- ۸: شکل شماتیک و نمایی از ویسکومتر بروکفیلد.....۴۸
شکل ۳- ۹ : (الف) همزن مافوق صوت، (ب) همزن مکانیکی.....۵۰
شکل ۳-۱۰: ترموکوپل ۵۱
شکل ۴- ۱: مقایسه ویسکوزیته اندازه‌گیری شده با داده‌های موجود در مراجع.....۵۴
شکل ۴-۲: نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش ۵۴
شکل ۴- ۳: نمودار تغییرات ویسکوزیته با افزایش غلظت نانوذرات ۵۵
شکل ۴-۴: تغییرات ویسکوزیته نانوسیال تحت میدان الکتریکی DC ۵۷
شکل ۴-۵: تغییرات ویسکوزیته نانوسیال تحت میدان الکتریکی AC ۵۷
شکل ۴-۶: نمودار ویسکوزیته بر حسب غلظت نانوذرات در شدت میدان‌های مختلف(DC) ۵۸
شکل ۴-۷: نمودار ویسکوزیته بر حسب غلظت نانوذرات در شدت میدان‌های مختلف(AC).....۵۹
شکل ۴-۸: اثر نوع میدان الکتریکی(AC و DC) روی ویسکوزیته سیال پایه ۵۹
شکل ۴-۹: اثر نوع میدان الکتریکی(AC و DC) روی ویسکوزیته نانوسیال با غلظت ۰/۰۱ درصد.....۶۰
شکل ۴-۱۰: اثر نوع میدان الکتریکی(AC و DC) روی ویسکوزیته نانوسیال با غلظت ۰/۰۳۵ درصد ۶۰
شکل ۴-۱۱: اثر نوع میدان الکتریکی(AC و DC) روی ویسکوزیته نانوسیال با غلظت ۰/۰۵ درصد ۶۱
شکل ۴-۱۲: نسبت ویسکوزیته نانوسیال به ویسکوزیته سیال پایه تحت میدان الکتریکی DC.....۶۲
شکل ۴-۱۳: نسبت ویسکوزیته نانوسیال به ویسکوزیته سیال پایه تحت میدان الکتریکی AC.....۶۳
شکل ۴-۱۴: نسبت ویسکوزیته در حضور میدان DC به ویسکوزیته در غیاب میدان در غلظت‌های مختلف ۶۳
شکل ۴-۱۵: نسبت ویسکوزیته در حضور میدان AC به ویسکوزیته در غیاب میدان در غلظت‌های مختلف ۶۴
شکل ۴-۱۶: تغییرات ویسکوزیته نانوسیال با افزایش زمان تماس با میدان مغناطیسی ۱۴۸۰ گوس ۶۵
شکل ۴-۱۷: تغییرات ویسکوزیته نانوسیال با افزایش زمان تماس با میدان مغناطیسی ۹۵۰ گوس ۶۶
شکل ۴-۱۸: تغییرات ویسکوزیته نانوسیال با افزایش زمان تماس با میدان مغناطیسی ۷۵۰ گوس ۶۶
شکل ۴-۱۹: تغییرات ویسکوزیته نانوسیال با افزایش شدت میدان مغناطیسی ۶۷
شکل ۴-۲۰: نمودار ویسکوزیته بر حسب غلظت نانوسیال تحت میدان مغناطیسی.....۶۷
شکل ۴-۲۱: نسبت ویسکوزیته در حضور میدان به ویسکوزیته در غیاب میدان مغناطیسی بر حسب غلظت.....۶۸
شکل ۴-۲۲: اثر افزودن نانوذرات روی نمودار ویسکوزیته بر حسب دما.....۷۱
شکل ۴-۲۳: اثر دما بر ویسکوزیته سیال پایه در حضور و در غیاب میدان الکتریکی ۷۱
شکل ۴-۲۴: اثر دما بر ویسکوزیته نانوسیال با غلظت ۰/۰۵ درصد در حضور و در غیاب میدان الکتریکی.....۷۲
شکل ۴-۲۵: اثر دما بر ویسکوزیته نانوسیال با غلظت ۰/۰۵ درصد در حضور و در غیاب میدان مغناطیسی.....۷۲
شکل ۴-۲۶: نسبت ویسکوزیته نانوسیال به ویسکوزیته سیال پایه بر حسب دما ۷۳

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: هدایت حرارتی جامدات و مایعات مختلف ۹
جدول ۲-۲: حد اشباع مغناطیسی ذرات با اندازه متفاوت ۴۰
جدول ۳-۱: خواص فیزیکی نانوذرات و سیال پایه ۴۹
جدول ۴-۱: درصد کاهش ویسکوزیته نانوسیال نسبت به سیال پایه با افزایش غلظت نانوذرات ۵۶
جدول ۴-۲: درصد کاهش ویسکوزیته تحت میدان الکتریکی ۶۴
جدول ۴-۳: درصد کاهش ویسکوزیته نانوسیال مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی ۶۹

فهرست علایم اختصاری

d : فاصله بین الکترودها (m)

E : شدت میدان الکتریکی (V/m)

f_e : نیروی حجمی الکتریکی (N/m^3)

F_{EP} : نیروی الکتروفورتیک (N)

F_{Drag} : نیروی ویسکوز هیدرودینامیکی (N)

F_{DEP} : نیروی دی‌الکتروفورتیک (N)

F_{Brown} : نیروی براونی (N)

F_m : نیروی مغناطیسی (N)

g : شتاب گرانش (m/s^2)

h : اختلاف ارتفاع بین سطح بالایی سیال داخل محفظه و خروجی لوله موئین (m)

H : قدرت میدان مغناطیسی (Am^{-1})

K_B : ثابت بولتزمن

K : گذردهی نسبی

L : طول لوله موئین (m)

m : جرم سیال اندازه‌گیری شده در مدت زمان t (Kg)

m_p : جرم نانوذرات (Kg)

M : خاصیت مغناطیس شوندگی (Am^{-1})

M_d : دامنه مغناطیس شوندگی (Am^{-1})

N : تعداد دفعات تکرار

P_∞ : مومنت دوقطبی مؤثر ذره

q : بار الکتریکی (C/m^3)

q_s : بار سطحی الکتریکی (C/m^3)

Q : دبی حجمی سیال (m^3/s)

r : شعاع لوله موئین (m)

t : زمان اندازه‌گیری (s)

T : دمای مطلق سیال (K)

u_p : سرعت نانوذره (m/s)

v : حجم سیال اندازه‌گیری شده در مدت زمان t (m^3)

v_E : فرکانس میدان (s^{-1})

v_f : حجم سیال (m^3)

v_n : متغیر مستقل nام

v_p : حجم نانوذرات (m^3)

V : اختلاف پتانسیل بین دو الکترود (V)

V_0 : ولتاژ اعمال شده (V)

w_n : بازه خطای متغیر مستقل nام

w_R : بازه خطای نتیجه آزمایشگاهی

علایم یونانی:

μ : ویسکوزیته دینامیک $(Pa.s)$

μ_b : ویسکوزیته دینامیک سیال پایه $(Pa.s)$

μ_{nf} : ویسکوزیته دینامیک نانوسیال $(Pa.s)$

ρ : دانسیته سیال (Kg/m^3)

ρ_p : دانسیته نانوذرات (Kg/m^3)

φ : کسر حجمی نانوذرات

ε : ضریب گذردهی الکتریکی سیال (F/m)

ε_0 : ضریب گذردهی الکتریکی خلأ (F/m)

σ : هدایت الکتریکی (Ω^{-1})

τ : زمان ماند بارهای الکتریکی (s)

ω_0 : سرعت زاویه‌ای (rad/s)

ξ : بردار تصادفی گوسین

$\dot{\gamma}$: سرعت برشی (s^{-1})

چکیده

با توجه به محدود بودن مطالعات انجام گرفته روی ویسکوزیته و خواص رئولوژیکی نانوسیالات مغناطیسی، در این تحقیق تغییرات ویسکوزیته نانوسیال مغناطیسی Fe_3O_4 در اتیلن‌گلیکول در حضور میدان‌های خارجی(الکتریکی و مغناطیسی)، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری ویسکوزیته از ویسکومتر لوله موئین و برای بررسی رفتار رئولوژیکی سیال پایه و نانوسیال از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد استفاده شد. سیال پایه اتیلن‌گلیکول خالص بود و از نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 در غلظت‌های ۰/۰۱، ۰/۰۱۵، ۰/۰۲، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۵ درصد حجمی استفاده شد. جهت بررسی صحت عملکرد ویسکومتر مورد استفاده، ویسکوزیته سیال پایه در دماهای مختلف اندازه‌گیری شده و با مقادیر موجود در منابع مقایسه شد. نتایج به دست آمده از ویسکومتر چرخشی حاکی از آن است که سیال پایه و نانوسیال در محدوده مورد آزمایش رفتار نیوتنی از خود نشان می‌دهند. افزودن نانوذرات به سیال پایه باعث کاهش ویسکوزیته آن شد. با افزایش غلظت نانوذرات از ۰/۰۱ درصد تا ۰/۰۵ درصد، ویسکوزیته از ۶/۳ تا ۱۰/۱ درصد کاهش پیدا کرد. برای بررسی اثر میدان الکتریکی، ویسکوزیته سیال پایه و نانوسیال با غلظت‌های مختلف تحت میدان‌های الکتریکی مستقیم و متناوب با شدت‌های متفاوت اندازه‌گیری شد. با افزایش شدت میدان الکتریکی در هر دو حالت DC و AC، ویسکوزیته نانوسیال و همچنین ویسکوزیته سیال پایه کاهش یافت. همچنین جهت بررسی اثر میدان مغناطیسی، ویسکوزیته نانوسیال اکسید آهن در اتیلن‌گلیکول در حضور میدان مغناطیسی ثابت و عمود بر جهت حرکت سیال اندازه گیری شد. میدان مغناطیسی به وسیله دو قطعه آهنربا که در اطراف لوله موئین قرار داده می‌شوند، اعمال شده‌است. نتایج نشان داد که ویسکوزیته نانوسیال مغناطیسی با افزایش شدت میدان مغناطیسی و همچنین با افزایش زمانی که نانوسیال در معرض میدان قرار می‌گیرد، کاهش می‌یابد. با اعمال میدان مغناطیسی بر سیال پایه، تغییر محسوسی در ویسکوزیته آن مشاهده نشد. با افزایش غلظت نانوذرات، تأثیر میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی افزایش یافت. بیشترین میزان کاهش ویسکوزیته(۴/۲٪)، تحت حداکثر شدت میدان اعمال مغناطیسی شده و برای نانوسیال با غلظت ۰/۰۵٪ بود. همچنین ویسکوزیته سیال پایه و نانوسیال با غلظت ۰/۰۵ درصد در محدوده دمایی ۲۰ تا ۳۵ درجه سانتیگراد، در غیاب و در حضور میدان‌های خارجی اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شد. تحقیق حاضر اولین کار تجربی در زمینه بررسی خواص حرکتی نانوسیال اکسیدآهن(Fe_3O_4) در اتیلن‌گلیکول تحت میدان الکتریکی است.

کلمات کلیدی: ویسکوزیته، نانوسیال، اتیلن‌گلیکول، نانوذرات Fe_3O_4، ویسکومتر لوله موئین، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی

فصل اول
مقدمه

خنک کردن و روانسازی در بسیاری از صنایع به خصوص صنعت حمل و نقل و نیز تولید انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به عبارت دیگر سیستم‌های خنک‌کننده یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های کارخانه‌ها و صنایع است، بنابراین استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده پیشرفته و بهینه، کاری اجتناب‌ناپذیر است. پیشرفت در عملیات با سرعت و قدرت بالا مانند توربین‌ها و موتورهای با کارایی بالا و بار حرارتی زیاد، به پیشرفت در خنک‌سازی و روانسازی نیاز دارد[۱].

سیال انتقال حرارت در افزایش کارایی وسایل انتقال حرارت نقش اساسی ایفا می کند. مشخص است که خواص حرارتی سیال گرم‌کننده یا خنک‌کننده نقش مهمی در توسعه تجهیزات انتقال حرارت ایفا می‌کند[۲].

سیالاتی مانند آب، اتیلن‌گلیکول و روغن موتور بازدهی انتقال حرارت ضعیفی دارند. از اینرو تلاش‌هایی برای بهبود انتقال حرارت صورت گرفته‌است، از آن جمله استفاده از افزودنی‌ها به مایعات را می توان نام برد. استفاده از سوسپانسیون‌هایی از ذرات با اندازه میلیمتر یا میکرومتر، هرچند تاحدی باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود، مشکلاتی نظیر پایداری کم سوسپانسیون، مسدود شدن کانال‌ها، افت فشار زیاد و خوردگی را نیز به وجود می‌آورد.

اصطلاح نانوسیال به نوع جدیدی از سیالات اطلاق می‌شود که از پراکنده‌کردن ذرات با اندازه نانو در سیال پایه تهیه می شود. این اصطلاح برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط چوی[1] پیشنهاد شد[۳].

نانوسیالات نوع جدیدی از سیالات هستند که از پراکنده‌کردن نانوذرات[2] فلزی و غیر فلزی در مقیاس نانو(با متوسط اندازه ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر) در یک سیال پایه، به منظور بهبود خواص حرارتی، نوری، مکانیکی و

[1] Choi
[2] Nano particles

رئولوژیکی آن، تولید می‌شوند. سیال پایه معمولاً یکی از سیالات انتقال حرارت مرسوم مثل آب، اتیلن گلیکول و روغن ویا مخلوطی از آن‌هاست[۴].

مزایای این دسته از سیالات عبارتند از[۲]:

۱- پایداری بهتر در مقایسه با سیالات حاوی ذرات جامد در مقیاس میکرو یا میلی متر،

۲- قابلیت رسانایی حرارتی بیشتر نسبت به سیال پایه.

برای مثال لی[1] گزارش کرده است که سوسپانسیون با غلظت ۴ درصد حجمی از نانوذرات اکسید مس با اندازه ۳۵ نانومتر در اتیلن گلیکول، ۲۰ درصد افزایش در هدایت حرارتی نشان می دهد[۳].

اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه روی خواص ترمو فیزیکی آن مثل دانسیته، ظرفیت گرمایی و ویسکوزیته تأثیر می گذارد. بنابراین برای به کار گرفتن نانوسیالات به عنوان سیال انتقال حرارت، لازم است تأثیر عوامل مختلف روی این خواص بررسی شود[۵].

از آنجا که مدل‌های تئوری مانند مدل ماکسول[2] و همیلتون- کراسر[3] قادر به تعیین دقیق خواص حرارتی نانوسیالات نیستند، مطالعه در زمینه مکانیسم‌های افزایش هدایت حرارتی این نوع سیالات لازم است[۳].

مزیت نانوسیالات در کاربردهای عملی مانند سردکردن موتور، سردکردن تراشه‌های الکترونیک، مبدل‌های حرارتی و ...، وقتی مشخص می‌شود که بررسی خواص انتقال حرارت و خواص جریان به صورت همزمان انجام شود. ویسکوزیته مؤثر نانوسیال یک خاصیت تعیین‌کننده است که سهولت جریان، افت فشار و نیروی لازم برای پمپ‌کردن سیال را کنترل می‌کند[۶].

داده‌های ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی، اطلاعات اساسی مهمی برای تشخیص جریان و انتقال حرارت جابجایی در سوسپانسیون‌های نانوذرات هستند. از بین گزارش‌های ارائه شده در این زمینه، داده‌های مربوط به ویسکوزیته و خواص جریانی نانوسیال نسبت به داده‌های ضریب هدایت حرارتی بسیار کمتر است[۷].

تعیین دقیق ویسکوزیته سیال عامل در کاربردهای حرارتی بسیار مهم است. روابط موجود برای ویسکوزیته نانوسیال، ویسکوزیته را به صورت تابعی از دما و غلظت بیان می‌کنند[۴]. کاربرد هر معادله محدودیت‌های خاصی دارد، دستیابی مستقیم و قابل اعتماد به ویسکوزیته ظاهری نانوسیالات از طریق آزمایش امکانپذیر است که می‌تواند منجر به ارائه روابط دقیق‌تر برای ویسکوزیته شود.

سیال مغناطیسی[4] یک سوسپانسیون کلوئیدی[5] از نانوذرات مغناطیسی و یک مایع حامل است. به واسطه خصوصیات منحصر به فرد، این نوع سیال، کاربردهای زیادی در زمینه‌های مختلف مثل بسته‌های الکتریکی، مهندسی مکانیک، هوا فضا و مهندسی بیوتکنولوژی پیدا کرده‌است. برای چنین کاربردهایی، ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی سیال مغناطیسی پارامترهای اساسی هستند که کارایی فرآیند را تعیین می‌کنند.

---

[1] Lee
[2] Maxwell
[3] Hamilton-Crosser
[4] Magnetic fluid
[5] Colloidal suspension

به طور کلی خواص انتقال این سیالات وابسته به خواص، غلظت، ابعاد، مورفولوژی و توزیع نانوذرات پراکنده شده و نیز خواص مایع حامل است. اگر یک میدان مغناطیسی خارجی نیز به کار گرفته‌شود، این میدان اثر تعیین کننده‌ای روی خواص انتقال سیال اعمال می‌کند. قدرت میدان و جهت آن از عوامل مؤثر بر ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی سیال مغناطیسی هستند. بنابراین به وسیله یک میدان مغناطیسی خارجی می توان فرآیندهای انتقال انرژی و جریان را تحت کنترل درآورد[۸].

در طول سال‌های گذشته، تعداد زیادی پژوهش در زمینه افزایش انتقال حرارت و انتقال جرم به روش الکتروهیدرودینامیک[1](EHD) توسط محققین گزارش شده‌است.کنترل سریع بازدهی با تغییر میدان الکتریکی اعمال شده، طراحی ساده، توان کم مورد نیاز و عدم وجود صدا و لرزش از مزایای کاربرد الکتروهیدرودینامیک است. کاربرد این پدیده در زمینه جریان‌های تک‌فازی و چندفازی به عنوان مسیری در زمینه انتقال جرم و حرارت به حساب می‌آید[۹].

طی سال‌های گذشته، افزایش انتقال حرارت با استفاده از یک میدان الکتریکی قوی به طور پیوسته مورد مطالعه قرار گرفته‌است. اغلب کارهای اخیر روی افزایش انتقال حرارت در جریان‌های تک‌فازی(سیستم‌های گازی و سیستم‌های مایع) انجام شده‌است. با توجه به مطالعات گسترده در زمینه بررسی اثر میدان الکتریکی بر انتقال حرارت، بررسی خواص حرکتی سیال انتقال حرارت تحت میدان الکتریکی نیز لازم می‌باشد.

معرفی پژوهش حاضر

تاکنون مطالعات بسیار محدودی در زمینه اثر میدان‌های خارجی بر خواص حرارتی و رئولوژیکی نانوسیالات مختلف و نیز نانوسیالات مغناطیسی انجام گرفته است.

از آنجائیکه افزایش ویسکوزیته در نانوسیالات نسبت به سیال پایه می تواند اثرات نامطلوبی بر خواص انتقال حرارت جابجایی آنها بگذارد، بررسی روشی که بتواند با ایجاد حرکت‌های اضافی در نانوسیالات سبب افزایش خواص انتقال حرارت و بهبود خواص حرکتی نانوسیال گردد، می‌تواند بسیار مؤثر باشد.

اعمال میدان‌های خارجی(مغناطیسی و الکتریکی) بر نانوسیالات به خصوص نانوسیالات مغناطیسی می‌تواند خواص حرکتی و حرارتی نانوسیال را تحت تأثیر قراردهد.

با توجه به محدودبودن مطالعات انجام گرفته روی ویسکوزیته و خواص رئولوژیکی نانوسیالات، به خصوص نانوسیالات مغناطیسی، هدف از انجام این تحقیق بررسی خواص انتقال در نانوسیالات مغناطیسی در حضور میدان‌های خارجی می‌باشد. تحقیق حاضر اولین کار تجربی در مورد نانوسیال اکسیدآهن(Fe_3O_4) در اتیلن‌گلیکول است. همچنین این پژوهش اولین کار تجربی در زمینه بررسی ویسکوزیته نانوسیال در حضور میدان الکتریکی می‌باشد.

در این پژوهش، ویسکوزیته اتیلن‌گلیکول اندازه‌گیری شد و اثر میدان الکتریکی یکنواخت DC و AC با دو الکترود صفحه‌ای موازی، روی ویسکوزیته آن مورد بررسی قرارگرفت. با افزودن نانوذرات مغناطیسی اکسیدآهن به سیال پایه، تأثیر آن بر ویسکوزیته بررسی شد. سپس اثر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر ویسکوزیته نانوسیال

[1] Electrohydrodynamic

آزمایش شد. همچنین اثر دما بر ویسکوزیته نانوسیال و سیال پایه در غیاب و در حضور میدان‌های خارجی(الکتریکی و مغناطیسی) مورد بررسی قرار گرفت.

در فصل بعد به مبانی و کارهای انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود. در فصل سوم دستگاه طراحی شده، نحوه اعمال میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، وسایل آزمایشگاهی مورد استفاده و نیز چگونگی انجام آزمایش‌ها و محاسبات مربوطه شرح داده می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش در فصل چهارم ارائه می‌شود. نتیجه‌گیری کلی و همچنین ارائه پیشنهاداتی در راستای بهبود و تکمیل این تحقیق، در فصل پنجم بیان می‌شود. نحوه محاسبه خطاهای اندازه‌گیری و محاسباتی در پیوست آورده شده‌است.

فصل دوم
بیان مفاهیم و مروری بر پژوهش‌های انجام شده

۲-۱ مقدمه

در این فصل کلیاتی در مورد ویسکوزیته و عوامل مؤثر بر آن، روابط تجربی ارائه شده برای تعیین ویسکوزیته سیالات و تأثیر اعمال میدان‌های خارجی(الکتریکی و مغناطیسی) بر خواص حرارتی و حرکتی سوسپانسیون‌ها بیان می‌شود. مفهوم نانوسیال و روش‌های مختلف آماده‌سازی آن شرح داده می‌شود. همچنین تلاش شده‌است گزارشی از مطالعاتی که در زمینه بررسی عوامل مؤثر بر ویسکوزیته نانوسیالات به ویژه نانوسیالات مغناطیسی انجام شده‌است، ارائه شود.

۲-۲ ویسکوزیته

ویسکوزیته یکی از پارامترهای مهم تأثیرگذار بر طراحی سیستم‌های شامل جریان سیال است، چرا که نیروی لازم برای پمپ‌کردن سیال و ضریب انتقال حرارت جابجایی سیالات به شدت به اعداد بدون بعد رینولدز و پرانتل بستگی دارد، این اعداد نیز به شدت از ویسکوزیته تأثیر می‌گیرند. بنابراین تعیین دقیق ویسکوزیته سیالات در کاربردهای حرارتی بسیار مهم است.

ابعاد ویسکوزیته FTL^{-2} است و بنابراین در دستگاه SI با واحد $N.s/m^2$ مشخص می‌شود. ویسکوزیته مایعات وابستگی کمی به فشار دارد و معمولاً از اثر فشار روی ویسکوزیته صرفنظر می‌شود، اما تأثیر دما روی ویسکوزیته بسیار زیاد است. برای مثال، با افزایش دمای آب از ۶۰ °F به ۱۰۰ °F چگالی آن کمتر از یک درصد کاهش می‌یابد،

در حالیکه کاهش ویسکوزیته آن حدود ۴۰ درصد است. بنابراین روشن است که در هنگام اندازه‌گیری ویسکوزیته کنترل دما از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

شکل (۲-۱) که نحوه تغییرات ویسکوزیته از یک سیال به سیال دیگر، و نیز برای یک سیال از یک دما به دمای دیگر را نشان می‌دهد. همچنین، از این شکل پیداست که ویسکوزیته مایعات با افزایش دما کاهش می‌یابد، در حالیکه افزایش دما در گازها به افزایش ویسکوزیته منجر می‌شود. این اختلاف در مایعات و گازها را می توان با توجه به ساختار مولکولی آنها توضیح داد. مولکولهای مایع بسیار به هم فشرده‌اند و نیروهای جاذبه بین مولکولی آنها قوی است، با افزایش دما این نیروهای جاذبه کاهش می‌یابند و در نتیجه کاهش متناظری در مقاومت در برابر حرکت به وجود می‌آید. از آنجا که ویسکوزیته شاخصی برای این مقاومت است، نتیجه می‌شود که با افزایش دما ویسکوزیته کاهش می‌یابد. اما در گازها، فاصله مولکولی بسیار زیاد است و می‌توان از نیروهای بین مولکولی صرفنظر کرد. در این حالت مقاومت در برابر حرکت نسبی ناشی از تبادل اندازه حرکت مولکول‌های گاز در بین لایه‌های مجاور خواهدبود. هنگامی که مولکول ها با حرکت‌های تصادفی خود از نواحی کم سرعت برای اختلاط با مولکول‌های موجود در ناحیه پر سرعت (و بر عکس)، انتقال می‌یابند، تبادل اندازه حرکت مؤثری وجود دارد که با حرکت نسبی بین لایه‌های گاز مقابله خواهدکرد. با افزایش دمای گاز، فعالیت تصادفی مولکولی و در نتیجه ویسکوزیته افزایش می‌یابد.

اثر دما روی ویسکوزیته را می توان با استفاده از دو فرمول تجربی تقریب زد. برای گازها از معادله ساترلند[1](رابطه (۲-۱)) استفاده می‌شود:

$$\mu = \frac{CT^{3/2}}{T+S} \qquad (۱-۲)$$

در این رابطه، C و S ثابت‌های تجربی و T دمای مطلق گاز است. برای مایعات نیز از رابطه (۲-۲) که معادله آندره[2] نام دارد، استفاده می‌شود:

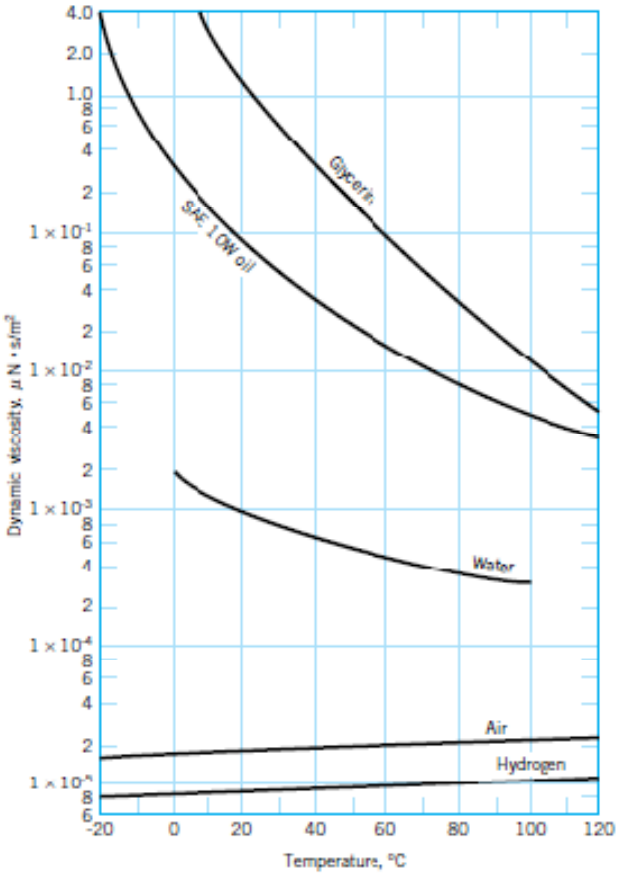
$$\mu = De^{B/T} \qquad (۲-۲)$$

در رابطه فوق نیز D و B ثابت‌های تجربی هستند[۱۰].

برای اندازه گیری ویسکوزیته از وسیله‌ای به نام ویسکومتر استفاده می‌شود. دو نوع اولیه از ویسکومترها برای مطالعه خواص رئولوژیکی مواد وجود دارد: ویسکومترهای چرخشی و لوله موئین. ویسکومترهای چرخشی در سه نوع دسته بندی می‌شوند: ویسکومتر چرخشی با استوانه‌های هم‌مرکز، ویسکومتر چرخشی مخروط و صفحه و ویسکومتر چرخشی با صفحه‌های موازی. گرچه ویسکومترهای چرخشی بازدهی بیشتری دارند، اما فقط می‌توانند برای محدوده کمی از نرخ برش به کار گرفته‌شوند و دقت اندازه‌گیری آنها نیز کم است. ویسکومترهای لوله موئین نسبت به نوع چرخشی چند مزیت دارند، آنها دامنه اندازه‌گیری وسیعتری دارند. دقت بالاتر و قابلیت کاربرد برای انواع سیالات و سوسپانسیون‌ها از مزایای دیگر این نوع ویسکومتر است[۱۱].

---

[1] Sutherland
[2] Andrade



شکل ۲-۱: نمودار ویسکوزیته بر حسب دما برای سیالات مختلف[۱۰]

۲-۳ نانوسیال

نانوفناوری، فرصت‌های جدیدی برای تولید و فرایندکردن مواد با اندازه متوسط کمتر از ۵۰ نانومتر، ایجاد کرده-است. نانوسیال به وسیله پخش و منتشرکردن ذرات جامد در اندازه‌های نانومتری در سیالات متداول منتقل‌کننده گرما مثل آب، اتیلن‌گلیکول و روغن موتور، ساخته می‌شود. نانوذرات معمولاً از جنس فلزات، اکسید فلزات و نانولوله‌های کربنی هستند و اغلب کروی و یا استوانه‌ای شکل هستند. نانوذرات پراکنده شده در سیالات پایه، می‌توانند جریان سیال و مشخصات انتقال حرارت سیالات پایه را تغییر دهند. از آنجا که ضریب هدایت حرارتی ذرات جامد معمولاً بزرگتر از سیالات می‌باشد(جدول۲-۱)، افزودن ذرات جامد به سیال پایه یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت شناخته شده‌است. استفاده از ذرات میکرومتری به دلیل مشکلات عملی نظیر ته‌نشین شدن سریع ذرات، ایجاد سایش شدید و افزایش افت فشار خصوصاً در مجاری باریک، میسر نیست[۱۲].