

## تأثیر مشخصات فیزیکی و شیمیایی رقیق کننده بر استخراج با حلال مس توسط استخراج کننده 5-nonylsalicylaldoxime

زهرا حیدری مفرد<sup>۱</sup>؛ سپیده جوانشیر<sup>۲\*</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد فراوری مواد معدنی، دانشگاه بیرجند  
۲- استادیار گروه معدن دانشگاه بیرجند، sjavanshir@birjand.ac.ir

(دریافت ۲۰ خرداد ۱۳۹۴، پذیرش ۲۶ خرداد ۱۳۹۵)

### چکیده

در این تحقیق پارامترهای مؤثر بر کیفیت رقیق کننده در استخراج با حلال مس توسط CP150 بررسی شد. حلال‌هایی با میزان آروماتیک متفاوت (۳۵-۵٪) تهیه شد. مقایسه پارامترهای استخراجی (سینتیک، ظرفیت، فاکتور انتقال آهن، زمان جدایش و ماندگی فازی) در حضور این ترکیبات، نشان داد که انتخاب رقیق کننده آروماتیک باعث بهبود جدایش فازها می‌شود؛ به طوری که با افزایش محتوای آروماتیک رقیق کننده از ۵٪ به ۳۵٪، زمان جدایش و ماندگی فازی نصف می‌شود؛ ولی سینتیک فرایند کند می‌شود. نفت سفید و برش‌های نفتی ریسول ۸۴۰۱ و ریسول ۸۴۱۱، نسبت‌های مختلف ترکیب شد و بعد از اندازه‌گیری محتوای آروماتیک، چگالی، ویسکوزیته و کشش سطحی هر ترکیب، تست‌های استاندارد استخراج با حلال ناپیوسته انجام شد. مطالعه هم‌زمان مشخصات رقیق کننده نشان داد در صورت استفاده از چند حلال در ترکیب رقیق کننده، محتوای آروماتیک به‌عنوان شاخص کیفی و بهینه‌سازی رقیق کننده کافی نیست و مشخصات فیزیکی ترکیب نیز باید لحاظ شود. کاهش ویسکوزیته رقیق کننده با بهبود شرایط پیوستگی و پراکندگی، سرعت فرایند را بالا می‌برد؛ به طوری که افزایش ویسکوزیته به میزان cSt ۰/۲، نسبت بازیابی در ۳۰ ثانیه را ۳۰ درصد کاهش می‌دهد. همچنین مشخص شد بالا بودن چگالی و کشش سطحی فاز آلی باعث اتلاف آن می‌شود؛ و اگر کشش سطحی رقیق کننده از ۲۶ mN/m به ۲۷/۳ mN/m تغییر یابد، ماندگی آلی دو برابر می‌گردد. هر چه اختلاف چگالی، ویسکوزیته و کشش سطحی بین دو فاز کمتر باشد (کاهش ویسکوزیته، افزایش چگالی و کشش سطحی رقیق کننده)، انتقال آهن به فاز آلی بیشتر می‌شود. به نحوی که با افزایش چگالی رقیق کننده به میزان  $۳۵ \text{ Kg/m}^3$ ، فاکتور انتقال ده برابر کمتر می‌شود.

### کلمات کلیدی

مشخصات فیزیکی و شیمیایی، رقیق کننده، استخراج مس، CP150

## ۱- مقدمه

قطرات بیشتر می‌شود. از این رو مخلوط بعد از توقف عمل هم زدن سریعاً رسوب کرده و تجمع می‌کند [۷].

بنابراین رقیق‌کننده می‌تواند با بهبود شرایط پراکندگی و پیوستگی فازها، سرعت انتقال فازی را افزایش داده و از تشکیل امولسیون، ماندگی فازها و انتقال ناخالصی‌ها جلوگیری می‌کند؛ همچنین به جدایش دو فاز کمک می‌کند [۸].

رقیق‌کننده‌های امروزی با توجه به واکنش‌پذیری پایین ترکیبات هیدروکربنی و قیمت پایین مواد نفتی، از فرآورده‌های نفت به دست می‌آیند و بر اساس درصد ترکیبات اشباع نشده یا محتوای آروماتیک طبقه‌بندی می‌شوند. امروزه در صنایع، حلال‌های آلیفاتیک (با میزان آروماتیک ناچیز) و ترکیبات آروماتیک (حاوی ۳۰-۱۰ درصد آروماتیک) استفاده می‌شود.

بنابراین جهت انتخاب رقیق‌کننده برای یک مدار، یک سری آزمایش با چند ترکیب متفاوت انجام می‌شود و با مقایسه عملکرد سیستم، رقیق‌کننده مناسب انتخاب می‌شود.

بیشاپ و گری<sup>۱</sup> چند حلال با درصد آروماتیک مختلف را مورد آزمایش قرار دادند و پی بردند بهترین شرایط استخراج با حلال مس توسط ۵- دو دسیل سالیسیل آلدوکسیم و تری دکانول<sup>۲</sup> در محدوده آروماتیک ۳۰-۱۰٪ مشاهده می‌شود [۹].

نتایج کار لو و زنگ<sup>۳</sup> (۱۹۹۸) نیز نشان داد که رقیق‌کننده‌هایی با ۳۰-۱۰ درصد آروماتیک بهترین راندمان و زمان شکست فازی را دارند و انتخاب‌پذیری سیستم در حضور رقیق‌کننده-هایی با ۳۰-۲۰ درصد آروماتیک بهینه خواهد شد [۱۰].

محققان شرکت شل سول<sup>۴</sup> (۲۰۱۱)، سه نوع حلال موجود در آمریکای لاتین را برای استخراج با حلال مس مقایسه کردند و دریافتند که رقیق‌کننده Shellsoil 2046 با آروماتیک متوسط نسبت به سایر رقیق‌کننده‌ها مناسب‌تر است [۱۱].

تأثیر میزان آروماتیک رقیق‌کننده بر استخراج مس با حلال LIX 984N، توسط رضایی و صرافی نیز بررسی شد [۱۲]. ولی تحقیقاتی در زمینه تأثیر مشخصات فیزیکی رقیق‌کننده انجام نشده است و فقط به تأثیر میزان آروماتیک (ترکیب شیمیایی) رقیق‌کننده توجه شده است.

بررسی‌های قبلی نشان داد زمانی که تنها یک برش نفتی به عنوان رقیق‌کننده استفاده شود، محتوای آروماتیک علاوه بر ترکیب شیمیایی، مشخصات فیزیکی را نیز مشخص می‌کند. به همین دلیل انتخاب رقیق‌کننده بر اساس ویژگی‌های فیزیکی لزومی نداشته است. اما در صورتی که در ترکیب رقیق‌کننده از

استخراج با حلال یک سیستم تعادلی فیزیکی- شیمیایی بین دو فاز غیرقابل اختلاط آبی و آلی است که استخراج‌کننده آلی با تشکیل یک کمپلکس آبران، یون هدف را استخراج کرده و در مرحله بعد با فراهم شدن شرایط عکس این واکنش، فلز مورد نظر با غلظت و خلوص مناسب به محلول آبی برمی‌گردد. با توجه به این‌که استخراج‌کننده‌ها مایعاتی لزج هستند و با افزایش بارگیری ویسکوزیته آن افزایش می‌یابد، در یک ترکیب آلی بی‌اثر رقیق می‌شوند [۱].

مشاهدات آزمایشگاهی و صنعتی محققین در زمینه استخراج با حلال فلزات و رقیق‌کننده‌های گوناگون نشان می‌دهد که نوع رقیق‌کننده تأثیر چشمگیری بر میزان استخراج و استریپ فلزات، همچنین سینتیک و انتخاب‌پذیری آن و نیز میزان مصرف مواد آلی و تولید کرات دارد [۴-۲].

از نظر عملیاتی در هر یک از مراحل استخراج و استریپ، ابتدا با اعمال یک نیروی برشی (اغلب در میکسر) اختلاط فازی انجام شده و یکی از فازها به صورت قطراتی در فاز دیگر پراکنده شده و سپس با حذف این نیرو (در ستلر)، پیوستگی و جداسازی فازها انجام می‌شود [۱].

بدیهی است که میزان پراکندگی دو فاز و همچنین سرعت و کیفیت جدایش آن‌ها به طبیعت فیزیکی رقیق‌کننده بستگی داشته باشد. علاوه بر این، سرعت واکنش‌های استخراج و استریپ به میزان پراکندگی دو فاز بستگی دارد و احتمالاً شرایط فیزیکی اختلاط دو فاز بر میزان استخراج مس و آهن نیز تأثیر بگذارد.

افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته (فاز آلی) از یک طرف باعث افزایش نیروی لازم برای اختلاط فاز شده و از طرف دیگر سبب پایداری بیشتر قطرات تشکیل‌شده می‌شود. همچنین افزایش اختلاف دانسیته بین دو محلول سرعت پیوستگی را افزایش می‌دهد [۵].

با افزایش کشش بین سطوح فصل مشترک، مقاومت قطرات جهت تشکیل کاهش یافته و این امر کاهش پیوستگی را به دنبال خواهد داشت [۶].

علاوه بر این هر چه اندازه قطرات و اختلاف چگالی زیاد و ویسکوزیته فاز پیوسته (فاز آلی) کمتر باشد، سرعت انعقاد

چگالی و ویسکوزیته با روش‌های D 1298 و D 445 استاندارد ASTM اندازه‌گیری شد [۱۴]. ترکیب رقیق‌کننده‌ها با کروماتوگرافی گازی - اسپکترومتری جرمی (GC-MS) توسط دستگاه Varian-Cp 3800 ساخت آمریکا تعیین شد. برای اندازه‌گیری کشش سطحی نیز از دستگاه تنسیومتر دیجیتال TDIC-Lauda کشور آلمان و با روش حلقه استفاده شد.

آزمایش‌های استخراج با حلال در شرایط ناپیوسته و طبق استاندارد آزمایشگاهی استخراج‌کننده‌های کمپلکس‌ساز شرکت CYTEC با نسبت رقیق‌کننده به استخراج‌کننده ۹:۱ انجام شد. استخراج‌کننده مورد استفاده در این تحقیق CP150<sup>۵</sup> ساخت شرکت SNF Flomine تولید کشور هند است. مرحله استخراج روی ۴۰۰ میلی‌لیتر محلول سولفات حاوی ۶ g/l مس و ۳ g/l آهن فریک، با نسبت فاز ۱:۱ و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد؛ pH محیط نیز با اضافه کردن اسید سولفوریک در ۲ ثابت شد.

بر اساس استاندارد تعریف شده، برای مرحله استریپ می‌بایست غلظت مس در فاز آلی حداقل ۵ g/l باشد، به این منظور ابتدا فرایند استخراج بر روی محلول ۱۰ g/l مس انجام شد و سپس محلول ۳۰ g/l مس و ۱۵۰ g/l گرم بر لیتر اسید سولفوریک برای استریپ مس موجود در فاز آلی به کار رفت [۱۵].

آزمایش‌ها در یک راکتور آزمایشگاهی با قطر داخلی ۱۰ cm و ارتفاع ۱۴ cm و ۴ تیغه بافل انجام شد که روی درپوش آن سه ورودی برای ورود مواد به ظرف و محور همزن و دماسنج تعبیه شده است. یک حمام آب جهت تنظیم دما و یک همزن مکانیکی با شش تیغه ۵ سانتی‌متری با ۶۰۰ - ۱۲۰۰ دور بر دقیقه نیز در ارتفاع کمتر از فصل مشترک دو فاز برای اختلاط مواد در نظر گرفته شد. آزمایشات در شرایط پیوستگی آلی و زمان ۱۵ دقیقه انجام شد و در هر آزمایش، پس از ۳۰ و ۹۰۰ ثانیه از شروع، نمونه ای از فاز آبی گرفته و توسط دستگاه اسپکتروفتومتر جذب اتمی میزان مس و آهن آن آنالیز شد.

چند حلال با دامنه کربنی و بازه جوش متفاوت استفاده شود، مشخصات فیزیکی را نمی‌توان بر اساس محتوای آروماتیک پیش‌بینی کرد [۱۳].

هدف از انجام این پژوهش مطالعه هم‌زمان تأثیر مشخصات فیزیکی و شیمیایی رقیق‌کننده بر استخراج مس است. بر اساس مطالعات انجام شده، چگالی، ویسکوزیته و کشش سطحی به عنوان پارامترهای فیزیکی مؤثر بر کیفیت رقیق‌کننده در نظر گرفته شد و با انجام آزمایش‌های استخراج با حلال ناپیوسته تأثیر ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی بر سرعت فرآیند، زمان جدایش دو فاز، هدررفت مواد آلی و میزان انتقال آهن به فاز آلی بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

به منظور مطالعه تأثیر ترکیب شیمیایی رقیق‌کننده، نفت سفید، ترکیب آلیفاتیک هگزان و ترکیب آروماتیک بنزن، در نسبت حجمی متفاوت ترکیب شد و رقیق‌کننده‌هایی با میزان آروماتیک ۳۵-۵٪ حجمی (میزان آروماتیک مرسوم در رقیق‌کننده های صنعتی) تهیه شد. به‌عنوان مثال، با اضافه کردن ۲۵۰ میلی لیتر هگزان به یک لیتر نفت سفید حلالی با ۲۵ درصد آروماتیک حاصل می‌شود.

برای مطالعه تأثیر مشخصات فیزیکی برش‌های نفتی موجود در مجتمع مس سرچشمه با نسبت‌های مختلف ترکیب و مشخصات فیزیکی آن اندازه‌گیری شد تا رقیق‌کننده‌هایی ساخته شود که دو مشخصه فیزیکی آنها یکسان و در پارامتر سوم با یکدیگر متفاوت باشند. به‌عنوان مثال برای بررسی اثر ویسکوزیته، ترکیباتی که دارای چگالی و کشش سطحی تقریباً یکسانی بودند، انتخاب و آزمایش‌های استخراج با حلال انجام شد؛ زیرا در عمل نمی‌توان یک رقیق‌کننده صنعتی (برش نفتی) با مشخصات فیزیکی دلخواه تولید کرد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی ترکیبات پایه رقیق‌کننده در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: خواص فیزیکی و شیمیایی حلال‌های مورد استفاده در رقیق‌کننده

مشخصه	استاندارد اندازه‌گیری	بنزن	هگزان	نفت سفید	ریسول ۸۴۱۱	ریسول ۸۴۰۱
محتوای آروماتیک (%)	ASTM D-1319	۱۰۰	۰	۳۰	۵۲	۲۵
چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM D445	۰/۸۷۹	۰/۶۵۹	۰/۸۰۵	۰/۸۴۵	۰/۸۰۸
ویسکوزیته (cSt)	ASTM D97	۲/۴	۱/۸	۱/۶	۱/۸	۲/۲
کشش سطحی (mN/m)	TDIC	۲۴	۱۸	۲۵/۷	۲۹	۲۷/۹

می‌یابد؛ زیرا سطح مشترک بین دو فاز در محیط‌های آلیفاتیک خیلی بیشتر از آروماتیک‌ها است. این تغییرات در مرحله استریپ نسبت به استخراج شدیدتر بوده است. قبوقب و بارکات<sup>۴</sup> دلیل این امر را انحلال‌پذیری بالای آروماتیک‌ها بیان کرده‌اند؛ حلالیت استخراج‌کننده در رقیق‌کننده و تشکیل کمپلکس بین آن‌ها باعث می‌شود مولکول‌های استخراج‌کننده آزادی عمل کمتری داشته و از سرعت واکنش کاسته شود [۱۶]. افزایش نسبت استریپ در محتوای آروماتیک بالای ۲۰ درصد به معنای افزایش ثابت تعادل واکنش نیست؛ بلکه میزان استریپ نهایی در این محدوده کاهش پیدا کرده است. بنابراین در محاسبه نسبت بازیابی افزایش مشاهده می‌شود.

نمودار مندرج در شکل ۱- ب نشان می‌دهد که منحنی بازیابی در ۹۰۰ ثانیه مشابه نسبت بازیابی در ۳۰ ثانیه نیست و با تغییر نوع رقیق‌کننده تغییر زیادی در بازیابی نهایی حاصل نمی‌شود. بنابراین اگر به فرایند زمان کافی داده شود، تغییرات سرعت استخراج (به دلیل تغییر نوع رقیق‌کننده) تأثیر چندانی نخواهد داشت. اما با توجه به این که زمان ماند در سیستم‌های استخراج با حلال کم است، میزان بازیابی در آغاز فرایند مهم‌تر است؛ زیرا بعد از زمان ۱۲۰ ثانیه، سرعت استخراج و استریپ مس توسط استخراج‌کننده‌های کمپلکس‌ساز به صفر می‌رسد و تنها آهن استخراج شده با مس جایگزین می‌شود [۱۶].

برای مقایسه سرعت استخراج و استریپ مس، نسبت فلز استخراج/ استریپ شده پس از ۳۰ و ۹۰۰ ثانیه محاسبه شد. میزان انتقال آهن به فاز آلی باردار با فاکتور انتقال مس نسبت به آهن مقایسه شد که به صورت نسبت ضریب توزیع دو فلز بعد از مرحله استخراج و قبل از شستشوی فاز آلی بیان می‌شود. فاصله زمانی بین خاموش کردن همزن و مشاهده یک مرز مشخص بین دو فاز به عنوان زمان جدایش ثبت شد. ماده آلی موجود در محلول با دستگاه سانتریفیوژ جدا شد تا اتلاف مواد آلی به واسطه ماندگی فاز آلی در آبی تعیین شود.

### ۳- ارائه و تحلیل نتایج

#### ۳-۱- تأثیر ترکیب شیمیایی رقیق‌کننده

جدول ۲ و ۳ تأثیر ترکیب شیمیایی رقیق‌کننده بر نسبت بازیابی و ظرفیت استخراج و استریپ، فاکتور انتقال، زمان جدایش و ماندگی فازی را نشان می‌دهد. این آزمایش‌ها با محلول‌های ساختگی سولفات آهن و مس و در شرایط استاندارد انجام شد تا شرایط ایجاد شده تنها تابع ساختار استخراج‌کننده و رقیق‌کننده باشد و تأثیر شرایط عملیاتی کارخانه، ناخالصی‌ها، مواد جامد محلول و ... دخیل نباشد.

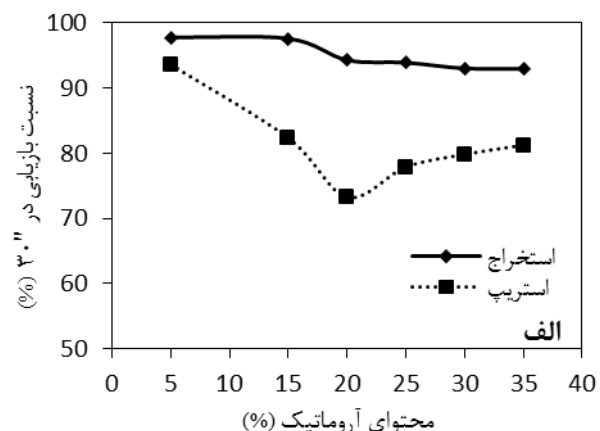
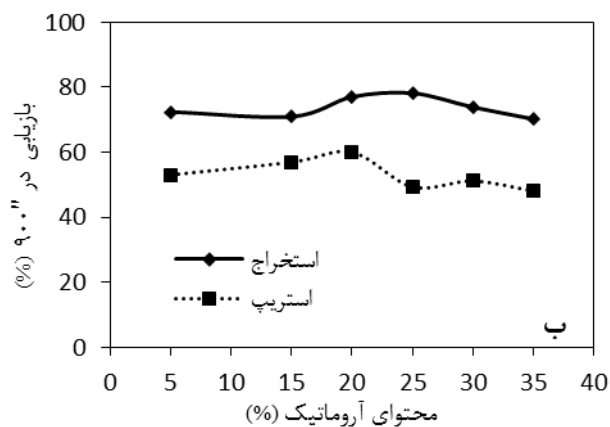
در شکل ۱- الف، نمودار نسبت بازیابی در ۳۰ ثانیه نسبت به محتوای آروماتیک رقیق‌کننده ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش محتوای آروماتیک موجود در رقیق‌کننده نسبت انتقال مس از فاز آبی به آلی و بالعکس کاهش

جدول ۲: تأثیر میزان آروماتیک رقیق کننده در استخراج مس توسط CP150

میزان آروماتیک (%)	نسبت استخراج در ۳۰" (%)	میزان استخراج نهایی (%)	فاکتور انتقال Cu/Fe(III)	ماندگی آلی در آبی (ppm)	زمان جدایش (S)
۵	۹۷/۸۱	۷۲/۴۸	۹۱	۱۵۸	۹۸
۱۵	۹۷/۶۲	۷۱	۷۵	۱۳۶/۵	۸۲
۲۰	۹۴/۳۲	۷۷/۰۶	۱۶۷	۶۸/۵	۶۲
۲۵	۹۳/۹۳	۷۸/۲۳	۱۳۰	۴۷/۵	۵۳
۳۰	۹۳/۰۵	۷۳/۹۱	۲۴۳	۲۹	۵۱
۳۵	۹۲/۹۵	۷۰/۲۸	۵۴۳	۲۶	۵۰

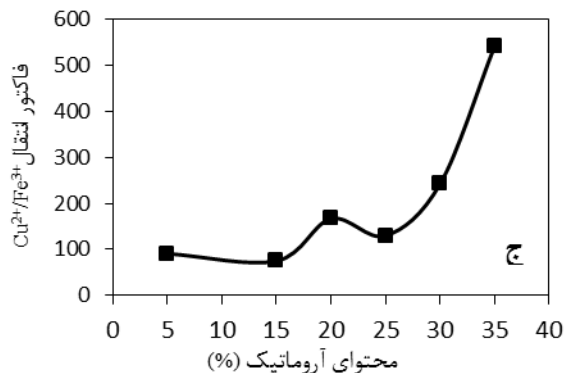
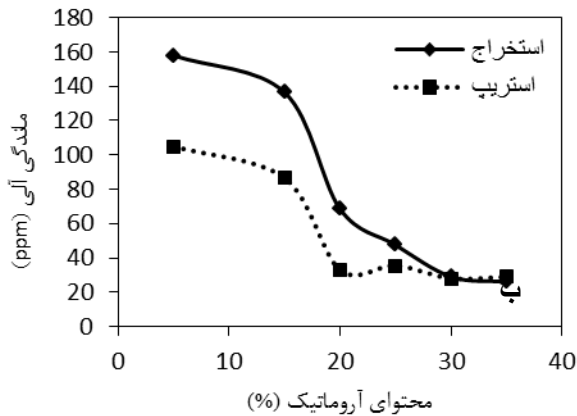
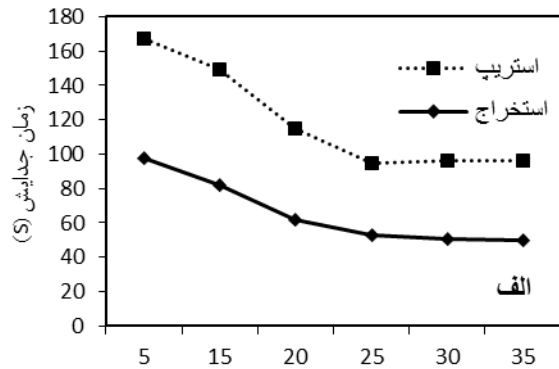
جدول ۳: تأثیر میزان آروماتیک رقیق کننده در استریپ مس از حلال CP150

میزان آروماتیک (%)	نسبت استریپ در ۳۰" (%)	میزان استریپ نهایی (%)	ماندگی آلی در آبی (ppm)	زمان جدایش (S)
۵	۹۳/۶۴	۵۲/۰۸	۱۰۵	۶۹
۱۵	۸۲/۳۶	۵۷	۸۶/۵	۶۷
۲۰	۷۳/۲۸	۶۰/۰۲	۳۳	۵۳
۲۵	۷۷/۹۱	۴۹/۳۸	۳۵/۵	۴۲
۳۰	۷۹/۸۶	۵۱/۱۹	۲۸	۴۵
۳۵	۸۱/۲۷	۴۸/۱۲	۲۹	۴۶



شکل ۱: تأثیر میزان آروماتیک رقیق کننده بر الف- نسبت بازیابی در ۳۰ ثانیه و ب- ظرفیت استخراج با حلال مس

شکل ۲ تغییرات زمان جدایش، ماندگی فازی و فاکتور انتقال مس/ آهن را نسبت به میزان آروماتیک رقیق کننده نشان می- دهد. با افزایش محتوای آروماتیک رقیق کننده، زمان جدایش



شکل ۲: تأثیر میزان آروماتیک رقیق کننده بر الف- زمان جدایش، ب- ماندگی آلی و ج- فاکتور انتقال در استخراج با حلال مس

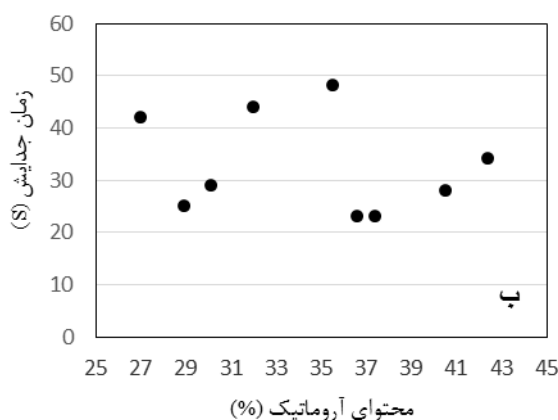
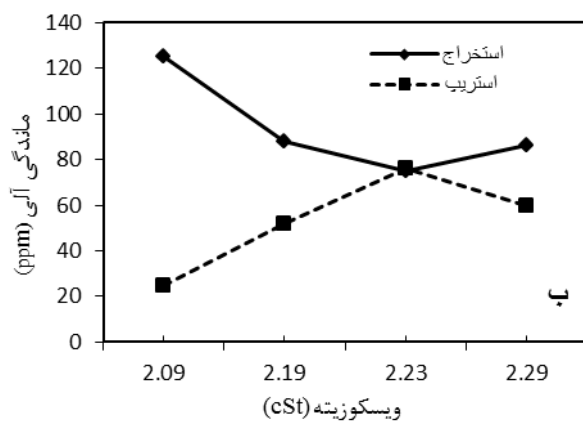
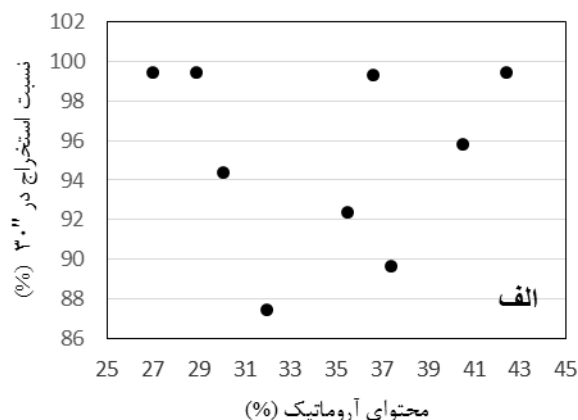
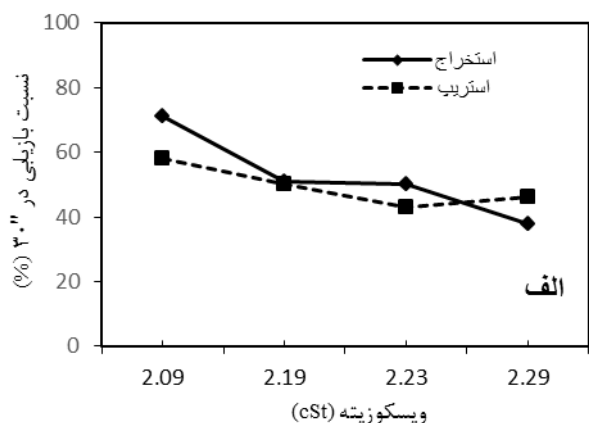
فازها و ائتلاف استخراج کننده از طریق ماندگی فاز آلی در فاز آبی کاهش می یابد؛ به طوری که با افزایش محتوای آروماتیک رقیق کننده از ۵ به ۳۵ درصد، زمان جدایش و ماندگی فاز آلی نصف می شود.

علاوه بر این، هر چه طبیعت رقیق کننده به حلال های آروماتیک نزدیکتر می شود، آهن کمتری همراه با مس به فاز آلی منتقل می شود (شکل ۲- ج). آزمایش ها نشان داد بیشتر آهن ورودی به فاز آلی به واسطه دنباله روی و ماندگی فاز آبی در آلی استخراج می شود [۱۳].

با توجه به نتایج، برای رسیدن به سینتیک مناسب در فرایند استخراج با حلال، باید از رقیق کننده آلیفاتیک استفاده کرد. اما افزایش میزان آروماتیک، کاهش ورود مواد آلی و یون فریک به مرحله الکترونیینگ و در نتیجه افزایش بازده جریان و کیفیت مس تولیدی را به همراه خواهد داشت. بنابراین، اگر قرار باشد برای مدارهای استخراج با حلال مس توسط CP150 یک رقیق کننده صنعتی با ترکیب نفت سفید استفاده شود، حلال مورد نظر باید دارای ۲۰-۳۰ درصد حجمی آروماتیک باشد. نتایج کار بیشاپ نیز نشان داد برای رسیدن به بازیابی و زمان شکست فاز آلی بهینه، رقیق کننده باید به ترتیب دارای ۱۰-۳۰ درصد حجمی و ۱۰-۵۰ درصد حجمی آروماتیک باشد [۹].

به منظور بررسی تأثیر میزان آروماتیک رقیق کننده بر فرایند استخراج با حلال، آزمایش های مرحله قبل در شرایطی که از ترکیب چند حلال به عنوان رقیق کننده استفاده شده بود، تکرار شد.

نتایج این آزمایش ها نسبت به درصد آروماتیک روند خاصی را دنبال نمی کند؛ به عنوان مثال نمودار پراکندگی نسبت استخراج در ۳۰ ثانیه و زمان جدایش فاز آلی نسبت به درصد آروماتیک در شکل ۳ قابل مشاهده است. بنابراین میزان آروماتیک به تنهایی نمی تواند معرف کیفیت رقیق کننده باشد و علاوه بر ترکیب شیمیایی رقیق کننده، نوع حلال و مشخصات فیزیکی آن نیز بر عملکرد استخراج با حلال تأثیرگذار خواهد بود. از این رو در ادامه به بررسی این موضوع پرداخته شد.



شکل ۳: نمودار پراکندگی الف-نسبت استخراج و ب-زمان جدایش نسبت به محتوای آروماتیک رقیق کننده

### ۳-۲- تأثیر مشخصات فیزیکی رقیق کننده

#### ۳-۲-۱- تأثیر ویسکوزیته

در شکل ۴ نمودار نسبت بازیابی در ۳۰ ثانیه، ماندگی آلی و فاکتور انتقال استخراج مس نسبت به ویسکوزیته رقیق کننده ترسیم شده است.

همان طور که در نمودار الف مشاهده می شود، اگر ویسکوزیته رقیق کننده از ۲/۰۹ cSt به ۲/۲۹ cSt برسد، نسبت بازیابی در ۳۰ ثانیه به ۹۰۰ ثانیه، ۳۰ درصد کاهش می یابد. می توان گفت افزایش ویسکوزیته رقیق کننده باعث کاهش سرعت استخراج با حلال می شود؛ زیرا در مرحله اختلاط فازها با افزایش ویسکوزیته فاز آلی (فاز پیوسته) مقاومت آن برای تشکیل قطرات در مرحله اختلاط افزایش پیدا می کند و تعداد قطرات کمتری تشکیل می شود. بنابراین با کاهش سطح مشترک بین دو فاز، یون های فلزی با سرعت کمتری منتقل می شود [۱۷].

شکل ۴: تأثیر ویسکوزیته رقیق کننده بر الف- نسبت بازیابی در ۳۰

ثانیه، ب- ماندگی آلی و ج- فاکتور انتقال در استخراج با حلال

(چگالی  $820 \text{ Kg/m}^3$ ، کشش سطحی  $25-25/5 \text{ mN/m}$ )

آبی در آلی نیز باعث افزایش جذب آهن می‌شود. اگر کشش سطحی از  $26 \text{ mN/m}$  به  $27/3 \text{ mN/m}$  تغییر یابد، اتلاف مواد آلی به واسطه ماندگی آلی دو برابر می‌شود و فاکتور انتقال  $50$  درصد کاهش می‌یابد. این موضوع در کار تحقیقاتی که توسط چن و همکاران<sup>۷</sup> با مدلسازی رفتار قطرات پلیمری انجام شده نیز عنوان شده است. آن‌ها دریافتند که با کاهش کشش بین سطوح دو فاز، انعقاد فاز پراکنده در چند مرحله انجام می‌شود و جدا شدن دو فاز به زمان بیشتری نیاز دارد و اگر زمان کافی داده نشود، بخشی از مواد آلی وارد فاز آبی شده و بخشی از ناخالصی‌های فاز آبی به فاز آلی برمی‌گردد [۱۸].

### ۳-۲-۳- تأثیر چگالی

در شکل ۶ تأثیر چگالی رقیق‌کننده بر نسبت بازیابی، ماندگی آلی و فاکتور انتقال مس نسبت به آهن آورده شده است. نمونه رقیق‌کننده‌های این آزمایش‌ها دارای ویسکوزیته  $2/4-2/3 \text{ cSt}$  و کشش سطحی  $25/5-25 \text{ mN/m}$  بودند.

با توجه به نمودار (۶-الف) به نظر نمی‌رسد چگالی تأثیر معناداری بر روی سرعت واکنش داشته باشد. با این وجود اختلاف اندک ویسکوزیته در این نمونه‌ها و تأثیر متقابل آن را نمی‌توان نادیده گرفت.

شکل‌های (۶-ب و ج) نشان می‌دهد اگر چگالی رقیق‌کننده زیاد شود، ماندگی آلی افزایش می‌یابد و فاکتور انتقال آهن نیز کم می‌شود. اگر چگالی رقیق‌کننده  $35 \text{ Kg/m}^3$  بیشتر شود، فاکتور انتقال  $10$  برابر کمتر خواهد شد.

هر چه اختلاف چگالی بین دو محلول مخلوط نشدنی بیشتر باشد، جدایش آن‌ها بهتر و در زمان کمتری صورت می‌گیرد و ماندگی کمتری مشاهده خواهد شد؛ زیرا نیروی پیوستگی فاز پراکنده با اختلاف چگالی دو فاز رابطه مستقیم دارد و هر چه چگالی فاز آلی به آب نزدیکتر شود، مقدار آب کمتری وارد فاز آلی خواهد شد. در نتیجه مقدار ناخالصی‌های موجود در فاز آلی نیز کمتر خواهد شد [۱۷، ۱۶].

شکل ۴-ب نشان می‌دهد که با افزایش ویسکوزیته رقیق‌کننده ماندگی فاز آلی در آبی کمتر می‌شود. در شرایط پیوستگی آلی امولسیون تشکیل شده ناپایدار بوده و در امولسیون‌های ناپایدار با افزایش ویسکوزیته حلال، ابعاد قطرات پراکنده بیشتر شده و زمان کمتری برای جدایش فازها لازم است؛ بنابراین در یک زمان ثابت، هر چه فاز آلی ویسکوزتر باشد، جدایش فازی با کیفیت بهتری صورت می‌گیرد و میزان دنباله‌روی فازها در یکدیگر کاهش پیدا می‌کند [۱۷].

اما در مرحله استریپ بر خلاف آنچه انتظار می‌رود، افزایش ویسکوزیته، منجر به افزایش میزان دنباله‌روی می‌شود. هرچه ویسکوزیته فاز آلی اولیه کمتر باشد، میزان مس بیشتری استخراج خواهد کرد (نمودار ۴-الف) و فاز آلی ثانویه در مرحله استریپ ویسکوزتر خواهد بود؛ چون افزایش بارگیری فاز آلی منجر به افزایش شدید ویسکوزیته فاز آلی می‌شود. بنابراین می‌توان گفت در مرحله استریپ نیز افزایش ویسکوزیته فاز آلی باعث کاهش ماندگی می‌شود [۱۸].

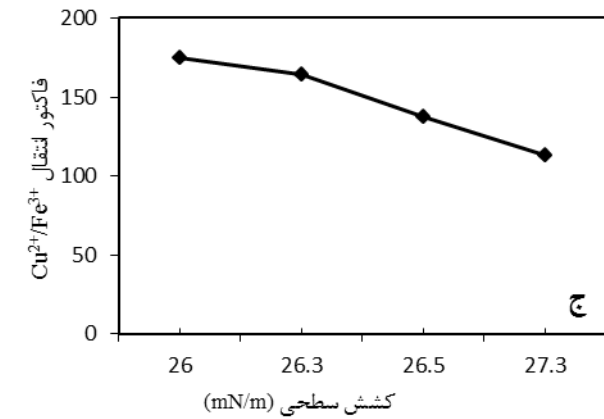
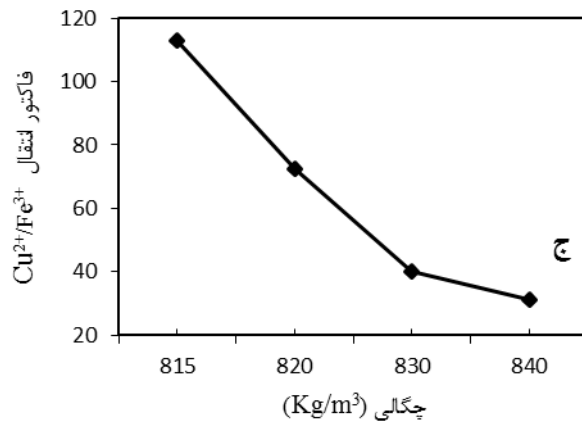
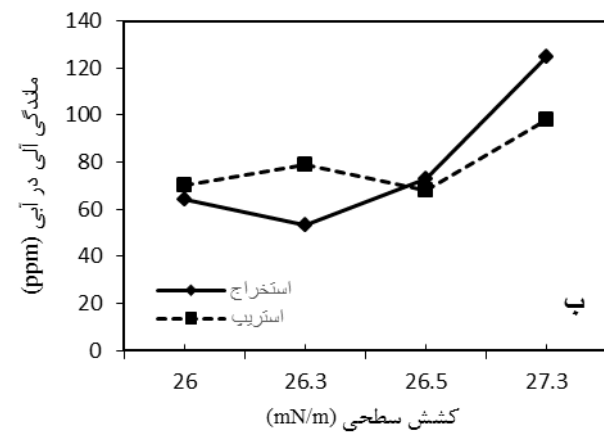
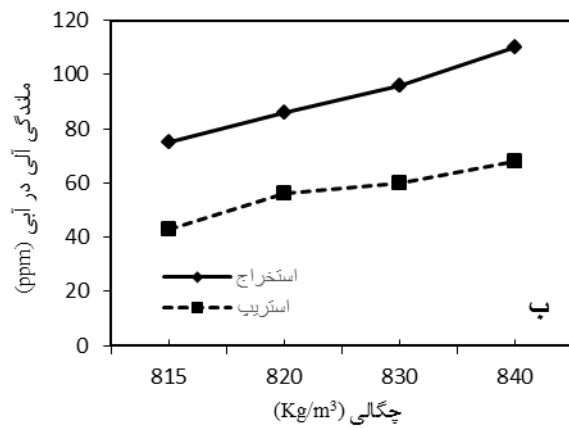
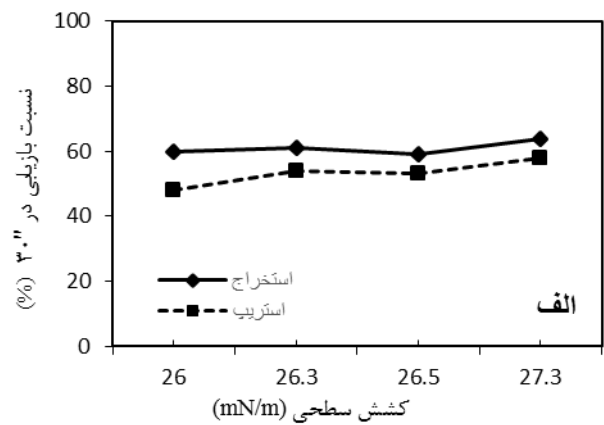
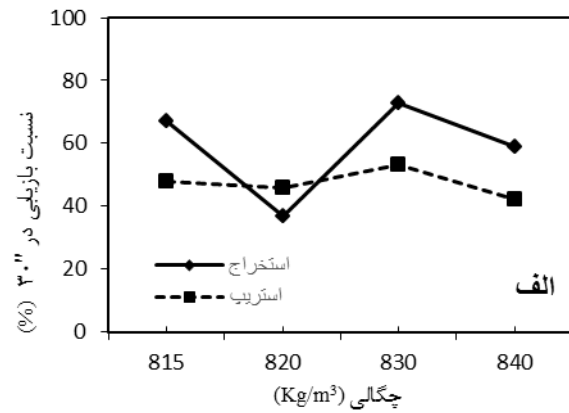
نمودار (۴-ج) نیز بیان می‌کند با افزایش ویسکوزیته فاکتور انتقال به‌طور چشمگیری افزایش پیدا کرده است و  $0/2 \text{ cSt}$  افزایش در ویسکوزیته باعث خواهد شد فاکتور انتقال مس نسبت به آهن از  $50$  به  $250$  برسد. بر اساس نمودار ۶-ب هرچه ویسکوزیته رقیق‌کننده بیشتر شود، فاز آبی موجود در فاز آلی کمتر می‌شود، بنابراین آهن کمتری استخراج خواهد شد.

### ۳-۲-۳- تأثیر کشش سطحی

برای بررسی تأثیر کشش سطحی آزمایش‌ها در حضور رقیق‌کننده‌هایی با چگالی  $835-830 \text{ Kg/m}^3$  ویسکوزیته  $2/45-2/35 \text{ cSt}$  و کشش سطحی متفاوت انجام شد. در شکل ۵ تأثیر کشش سطحی رقیق‌کننده بر نسبت بازیابی، ماندگی آلی و فاکتور انتقال فرایند استخراج با حلال بررسی شده است.

با افزایش کشش سطحی رقیق‌کننده، کشش بین سطوح فاز آلی و آبی کاهش و سطح تماس دو فاز افزایش خواهد یافت که تا حدی منجر به سرعت انتقال یونی بالاتر می‌شود [۹]؛ نتایج تحقیق نشان داد که این تأثیر در کار مذکور قابل چشم‌پوشی است (شکل ۵-الف) نمودار مندرج در شکل (۵-ب و ج) نشان می‌دهد که اگر چه کشش سطحی تأثیری بر روی نسبت بازیابی ندارد، اما افزایش کشش سطحی منجر به کاهش کشش بین سطوح دو فاز و افزایش ماندگی می‌شود و افزایش ماندگی فاز





شکل ۵: تأثیر کشش سطحی رقیق کننده بر الف- نسبت بازیابی در ۳۰ ثانیه، ب- ماندگی آلی و ج- فاکتور انتقال در فرایند استخراج (چگالی ۸۳۵-۸۳۰، ویسکوزیته ۲/۴۵-۲/۳۵ cSt)

شکل ۶: تأثیر چگالی رقیق کننده بر الف- نسبت بازیابی در ۳۰ ثانیه، ب- ماندگی آلی و ج- فاکتور انتقال در فرایند استخراج (کشش سطحی ۲۵/۵-۲۵، ویسکوزیته ۲/۴۵-۲/۳۵ cSt)

## ۴- نتیجه گیری

این مطالعه با هدف بررسی تأثیر مشخصات فیزیکی و شیمیایی رقیق کننده بر استخراج با حلال مس توسط استخراج کننده CP150 انجام و نتایج ذیل حاصل شد:

- هرچه طبیعت رقیق کننده به حلال های آروماتیک نزدیک تر شود، اتلاف مواد آلی و ورود ناخالصی به واسطه ماندگی کمتر می شود؛ به طوری که با افزایش محتوای آروماتیک رقیق کننده از ۵٪ به ۳۵٪، زمان جدایش و ماندگی فازی نصف می شود ولی سینتیک فرایند کند می گردد. در مقابل برای رسیدن به سینتیک مناسب باید از رقیق کننده آلیفاتیک استفاده شود.

- در صورت استفاده از چند حلال در ترکیب رقیق کننده، محتوای آروماتیک به عنوان شاخص کیفی و بهینه سازی رقیق کننده کافی نیست و مشخصات فیزیکی ترکیب نیز باید لحاظ شود.

- افزایش ویسکوزیته باعث می شود ماندگی آلی به شدت کاهش پیدا کند و میزان انتقال آهن به فاز آلی کم شود ولی از سرعت فرایند نیز کاسته خواهد شد. با افزایش ویسکوزیته رقیق کننده به میزان ۰/۲ cSt، فاکتور انتقال مس نسبت به آهن از ۵۰ به بیش از ۲۵۰ می رسد و نسبت استخراج مس در ۳۰ ثانیه، ۳۰٪ کمتر می شود.

- کشش سطحی تأثیری بر روی نسبت بازیابی ندارد؛ ولی افزایش کشش سطحی، منجر به افزایش ماندگی آلی و میزان آهن جذب شده می گردد. اگر کشش سطحی از ۲۶ mN/m به ۲۷/۳ mN/m تغییر یابد، اتلاف مواد آلی به واسطه ماندگی آلی دو برابر می شود و فاکتور انتقال ۵۰٪ کاهش می یابد. همچنین اگر بر چگالی رقیق کننده  $3 \text{ Kg/m}^3$  افزوده شود، فاکتور انتقال ده برابر کمتر می شود.

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان از مساعدت و حمایت مالی واحد تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه به ویژه پرسنل محترم واحد تحقیقات هیدرومتالورژی کمال تشکر را دارند.

## مراجع

[1] Flett, D.S.; (2004); "Principles and practices of solvent extraction"; Second Edition, Revised and Expanded; Marcel Dekker, New York.

[2] Kuipa, P; Hughes, M.A.; (2002); "Diluent effect on distribution ratio of copper"; Separation science and technology; Volume 37; Pp.1135-1152.

[3] Alguacil, F. J.; Amer, S.; Luis, A.; (1978); "The Influence of The Diluent on The Extraction of Iron(III) from Aluminium Sulphate Solutions by The Amine Primene 81R Sulphate"; Hydrometallurgy; Volume 18; Pp 65-73.

[4] Ispar-L Material Safety Data Sheet Provided by Exxon, 2010.

[5] Chen, X; Mandre, S; Feng, J; (2006); "An Experimental Study of the Coalescence between a Drop and an Interface in Newtonian and Polymeric Liquids"; Physics of Fluids; Volume 18. No. 9.

[6] Hashem, M. A.; El-Bassuoni, A. A.; (2007); "Drop Formation Mass Transfer Coefficients in Extraction Columns", Theoretical Foundations of Chemical Engineering 41, 506-51.

[7] Wegener, M.; Grunig, J.; Paschedag, A. R.; Kraume M.; (2007); "Transient Rise Velocity and Mass Transfer of a Single Drop with Interfacial Instabilities- Experimental Investigations," Chemical Engineering Science; Volume 62; Pp 2967-2978.

[8] Habashi, F; (1999); "A Textbook of Hydrometallurgy"; Métallurgie Extractive Québec, Québec City; Second edition; Volume 2; Pp. 115-118.

[9] Bishop, M; Gray, L; (1996); "Technical Developments Leading to Modern Solvent Extraction Diluents"; SME Annual Meeting; Phoenix, Arizona: Tomasha Assoc. Tucson, Arizona.

[10] Luo, Q.; Zhang, A.; (1998); "Selection of Diluents for Copper Extraction from Oil Products"; Journal of Central South University; Volume 5; No.1; Pp. 127-131.

[11] Haige, P.A.; Duthie, A.M.; Valladares, S.M.; (2011); "Copper Solvent Extraction Diluent Choice- Optimised Properties Equals Optimized Plant Performance". 19<sup>th</sup> International solvent extraction conference 2011, Santiago, Chile.

[۱۲] حسین رضایی، منیژه؛ صرافی، امیر؛ ۱۳۹۳؛ بررسی اثر آروماتیک ها در رقیق کننده جهت بهینه سازی فرآیند استخراج مس به روش استخراج با حلال؛ اولین همایش ملی مس ایران، کرمان.

[۱۳] حیدری مفرد؛ زهرا؛ ۱۳۹۳؛ تأثیر رقیق کننده بر انتخاب پذیری استخراج مس نسبت به آهن در کارخانه SX سرچشمه؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند.

[14] American Society for Testing and Materials; (2012); “Annual Book of ASTM Standards. Petroleum Products and Lubricants (I)”; D-Series. ASTM; West Conshohocken; PA, USA; Volume 05; Pp. 1638.

[15] ACORGA® (2005) Extraction Reagents: Standard Test Methods, viewed 2013.

[16] Ghebghoub, F; Barkat, D; (2009); “The Effect of Diluents on Extraction of Copper (II) with Di (2-ethyl hexhyl) phosphoric Acid”, Journal of Coordination Chemistry; Volume 62; Pp 1449-1456.

[17] Donni, A; (2011); “Single-Drop Based Modelling of Solvent Extraction in High-Viscosity Systems”; Ph.D. Thesis, Hochschulbibliothek Rheinisch-Westfälische Technischen Hochschule Aachen .

[18] Kristi, C; Rutledge, V; Garn, T; Law, J; (2011); “Fundamental Drop Dynamics and Mass Transfer Experiments to Support Solvent Extraction Modeling Efforts”; National Laboratory Fuel Cycle Research & Development Idaho Falls, No. 11, Idaho 83415.

---

<sup>1</sup> Bioshop and Gray

<sup>2</sup> 5-dodecyl salicyl aldoxime & Tridecanol

<sup>3</sup> Luo and Zhang

<sup>4</sup> Shell Sol

<sup>5</sup> 5-nonylsalicylaldoxime and a branched chain diisobutyrate modifier

<sup>6</sup> Ghebghoub & Barkat

<sup>7</sup> Chen et al