



هفتمین کنگره سالانه
انجمن مهندسين متالورژي ايران

۲۳-۲۱ مهرماه ۱۳۸۲
دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی و علم مواد



استحصال پنتاکسید وانادیم از کاتالیزورهای مصرفی

رسام بدیعی^۱، سید خطیب الاسلام صدرنژاد^۲

۱ و ۲- دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

امروزه به علت اعمال قوانین سختگیرانه زیست محیطی و کاهش صادرات مواد خام اولیه از جانب کشورهای دارنده معادن وانادیم، تمایل به بازیافت وانادیم از منابع ثانویه روبه افزایش نهاده است. در این تحقیق بمنظور بازیابی اکسید وانادیم از کاتالیزورهای مستعمل از روش ترکیبی شامل فرآیندهای پیرو و هیدرومتالورژی استفاده شده است بطوریکه پس از تشویه قلیائی پوشش کاتالیزور محتوی وانادیم توسط نمک کربنات سدیم و حل سازی محصول تشویه در آب، ناخالصیهای همراه بکمک تنظیم چند مرحله ای pH ، بمقدار قابل ملاحظه ای جداسازی شده و پس از ترسیب کیک قرمز از محلول وانادات خالص و حل سازی مجدد در محلول کربنات سدیم، پنتاکسید وانادیم موجود در محلول با درجه خلوص بیش از ۹۵٪ از طریق تکلیس رسوب متوانادات آمونیوم حاصل از افزودن کلرید آمونیوم به محلول قلیائی سودا اش استحصال گردید. عوامل موثر بر فرآیند نظیر مقدار نمک، اندازه ذرات، نسبت جامد به مایع، دما و زمان در مراحل مختلف بررسی و نتایج ارائه گردیده است.

واژه های کلیدی: وانادیم، کاتالیزور، تشویه نمکی، استخراج، بازیافت

۱- کارشناس ارشد مهندسی متالورژی دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف

مقدمه

مطالعه در خصوص فلز وانادیم و ترکیبات آن در ایران، به سبب وجود منابع بازیافتی و زمینه های متعدد بکارگیری، از جذابیت و اهمیت فراوان برخوردار است. مهمترین ترکیب وانادیم، ترکیب نارنجی رنگ پنتاکسید وانادیم V_2O_5 می باشد که در فرم تجاری بصورت ورقه های گداخته شده یا پودر موجود می باشد. این اکسید رفتاری مابین بالاترین اکسیدهای تیتانیم و کروم دارد، بطوریکه مقاومت حرارتی آن از CrO_3 بیشتر و از TiO_2 کمتر میباشد و خواص اسیدی و اکسیدکنندگی آن بیش از TiO_2 و کمتر از CrO_3 است [۱]. پنتاکسید وانادیم علاوه بر دارا بودن نقش واسطه در تولید فلز وانادیم بروش متالوترمی، بعنوان یک کاتالیزور اکسیداسیونی در فرآیندهای کاتالیزوری همگن و غیر همگن دارای کاربرد فراوان بوده و در تولید آلیاژهای VAl و FeV نیز استفاده از ورقه های گداخته شده V_2O_5 بسبب تقلیل وزن حرارتی کم، میزان کم غبار و گوگرد موجود در آن و چگالی بالای اکسید در حالت مذاب نسبت به پودر فلز، ترجیح داده می شود.

پیش از این تحقیقاتی در زمینه بازیابی اکسید وانادیم از خاکستر نیروگاه های حرارتی کشور انجام شده و مطالعاتی نیز در خصوص تشویه کربناتی سرباره وانادیم دار و حل سازی واناداتها در محلول آبی صورت پذیرفته است، لیکن در تحقیق حاضر استحصال پنتاکسید وانادیم با خلوص بالا از کاتالیزورهای مصرف شده برای نخستین بار در کشور مورد توجه قرار گرفته است. امروزه تشدید قوانین سختگیرانه زیست محیطی و جلوگیری از انباشت و جابجایی مواد سمی، سبب گردیده است که کشورها و شرکتها، مواد دورریز و پسماند خود را بر اساس شرایط مکانی، وضعیت بازار و تکنولوژی موجود، بمنظور بازیابی عناصر و ترکیبات ارزشمند مورد فرآوری قرار دهند. در این تحقیق از کاتالیزورهای مصرف شده در صنایع شیمیایی و پتروشیمی کشور که غالباً در اثر اشغال شدن سایت های فعال خود توسط مکانیزم های آلودگی یا مسمومیت با عواملی نظیر گوگرد، کارائی لازم را از دست داده اند بعنوان ماده خام ثانویه جهت بازیابی وانادیم استفاده شده است [۲]. در مقاله حاضر از روش ترکیبی بمنظور استحصال پنتاکسید وانادیم استفاده شده است و عوامل موثر بر فرآیند مذکور نظیر مقدار نمک، اندازه ذرات، دما، زمان و نسبت جامد به مایع بمنظور تعیین شرایط بهینه مورد بررسی قرار گرفته است.

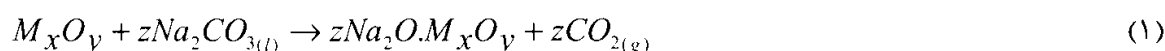
روش تحقیق

کاتالیزوری که در تحقیق حاضر به عنوان ماده اولیه بمنظور بازیافت وانادیم مورد استفاده قرار گرفته است، گلوله های به قطر تقریبی ۷ mm دارای پوشش حاوی وانادیم می باشد. ترکیب عناصر موجود در پوشش نیز بروش XRF مشخص گردیده است (جدول ۱). از جمله دلایل انتخاب کاتالیزور مصرف شده در این تحقیق بعنوان ماده اولیه می توان به مواردی نظیر در دسترس بودن این کاتالیزورها از جانب صنایع شیمی و پتروشیمی کشور، صرفه اقتصادی عملیات بازیافت و اعمال قوانین سختگیرانه زیست محیطی و جلوگیری از انباشت مواد شیمیایی مصرف شده اشاره نمود. علاوه بر این، عیار نسبتاً پائین وانادیم در کاتالیزورهای مذکور و وجود عناصر متعدد و مزاحم بهمراه آن، قابلیت بکارگیری روش مورد استفاده جهت استخراج وانادیم از این کاتالیزورها را به سایر مواد خام وانادیم دار نیز تعمیم می دهد.

جدول ۱: نتیجه آنالیز پوشش کاتالیست بروش XRF

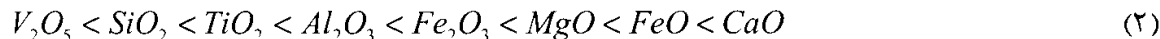
Z	wt.%	StdErr	Z	wt.%	StdErr	Z	wt.%	StdErr
11 Na ₂ O	.42	.05	17 Cl	.084	.007	26 Fe ₂ O ₃	2.9	.08
12 MgO	.27	.02	19 K ₂ O	.093	.007	29 CuO	1.2	.05
13 Al ₂ O ₃	.46	.03	20 CaO	.77	.04	30 ZnO	.51	.03
14 SiO ₂	3.1	.08	22 TiO ₂	84.6	.2	40 ZrO ₂	.021	.002
15 P ₂ O ₅	.42	.02	23 V ₂ O ₅	4.9	1	41 Nb ₂ O ₅	.016	.003
16 SO ₃	.17	.01	25 MnO	.012	.003	82 PbO	.060	.005

با توجه به اینکه حلالیت V₂O₅ در آب کم و در حدود ۰/۱-۰/۸ گرم در ۱۰۰ گرم آب میباشد، از تشویه نمکی ماده خام محتوی وانادیم بمنظور تشکیل واناداتهای قابل حل در آب استفاده می شود. در عملیات تشویه معمولاً از نمکهای سدیم به سبب قیمت کم و راندمان بالای بازیابی استفاده می شود. در این تحقیق از نمک کربنات سدیم بسبب برخوردار بودن از خاصیت قلیائی بالا و قدرت تهاجمی مناسب نسبت به ساختار اکسیدهای اسیدی و عدم نیاز به حضور بخار آب در محیط استفاده شده است. واکنش های انجام شده در این مرحله با توجه به عناصر همراه وانادیم در ماده اولیه، مطابق ذیل میباشد؛ [۳]

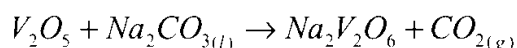


در واکنش جامد-مذاب فوق M می تواند؛ V، Fe، Al، Si و Ti باشد.

بازیسته اکسیدهای موجود مطابق رابطه ذیل افزایش میابد؛ [۳]



باتوجه به اینکه Na₂O بعنوان یک باز قوی تمایل به واکنش با اکسیدهای اسیدی دارد، ترکیبات وانادات، سیلیکات، تیتانات، آلومینات و فرات سدیم بصورت تئوری قابل تشکیل می باشند. واکنش تشکیل متاوانادات سدیم در مرحله تشویه نمکی مطابق رابطه (۳) است؛



آزمایش های مرحله تشویه بمنظور تعیین نوع نمک و اثر نسبت وزنی آن به ماده خام، تاثیر اندازه ذرات نمک و تعیین نقش دما و زمان عملیات تشویه بر افزایش راندمان بازیابی وانادیم در محلول لیچینگ، پس از حل سازی کلسین در آب داغ تحت شرایط یکسان طراحی گردید. بدین منظور پوشش کاتالیزورها بعنوان ماده خام وانادیم دار با دانه بندی معلوم بهمراه نسبتهای مختلف نمکها در بوته های آلومینائی با سطح در معرض نسبتاً زیاد، درون یک کوره موفلی در محدوده دمائی ۸۰۰-۱۰۰۰ °C تشویه شد. بوته ها پس از مدت زمان از پیش تعیین شده از کوره خارج شدند و سریعاً در معرض وزش هوای سرد، خنک گردیدند تا از برگشت واکنشها جلوگیری شود [۴]. سپس کلسین بدست آمده از هریک از بوته ها، تحت خردایش قرار گرفت تا اندازه ذرات آن به کمتر از ۲۵۰ μm برسد. پس از آن بطور جداگانه با نسبت وزنی جامد به مایع ۵ به ۱۰۰ در آب مقطر در دمای ۷۵ ± ۲ °C تحت شرایط همزدن متوسط بمدت ۳۰ دقیقه، حل سازی شد. محلول پس از فیلتر کردن و جدا شدن از جامد باقیمانده بمنظور تعیین درصد بازیابی وانادیم بروش I.C.P. مورد آنالیز قرار گرفت. درصد بازیابی وانادیم از تقسیم میلی

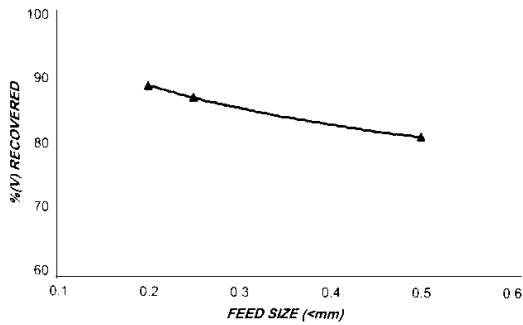
گرم وانادیم موجود در محلول حل سازی کلسین منتج از آنالیز بروش I.C.P. بر میلی گرم وانادیم موجود در ماده اولیه مورد تشویه، ضربدر ۱۰۰ محاسبه گردیده و عدد حاصل به یک رقم اعشار گرد شده است. آزمایش های مرحله لیچینگ نیز با در نظر گرفتن عوامل موثر بر فرآیند نظیر نسبت جامد به مایع، سرعت همزدن، دما و زمان حل سازی بمنظور دستیابی به شرایط بهینه استخراج وانادیم از پوشش کاتالیزورها، طرح ریزی گردید. بدین منظور مقدار مشخص از ماده اولیه با ۲۵ درصد وزنی نمک کربنات سدیم بطور کامل مخلوط شده و تا اندازه ذرات کمتر از $200\ \mu\text{m}$ خرد شد و مخلوط درون یک بوته آلومینائی بمدت ۲ ساعت در دمای 950°C قرار داده شد تا واکنشهای تشویه کامل شود. پس از آن بوته از کوره خارج شد و کلسین سریعاً در معرض وزش هوای سرد قرار داده شد. محصول تشویه سپس درون هاون تا $250\ \mu\text{m}$ خرد شده و جهت انجام آزمایشهای مرحله لیچینگ در نظر گرفته شد. در تمامی آزمایش ها اثر یک پارامتر با ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین عملیات تصفیه بمنظور کاهش میزان ناخالصیها و بدست آوردن محلول وانادات با خلوص مناسب در این مرحله صورت گرفته است. حلالیت متاوانادات سدیم در آب 25°C ، $21/1\ \text{g}$ در $100\ \text{cc}$ و در آب 75°C ، $38/8\ \text{g}$ در $100\ \text{cc}$ میباشد [۵]. بمنظور طرح ریزی عمل تصفیه، مناطق پایداری اکسیدهای جامد و یونهای وانادیم برای pH و پتانسیل های متفاوت محلول $0/01$ مولار وانادیم در دمای 25°C مورد بررسی قرار گرفت و با در نظر گرفتن حلالیت یونهای مختلف عناصر ناخالصی در آب و براساس دیاگرام پوربه هر کدام، ناخالصیها ته نشین شده و پس از فیلتراسیون، محلول وانادات با خلوص بالا بدست آمد [۶]. محلول باردار لیچینگ^۱ محتوی وانادیم، پس از تصفیه از باقیمانده جامد جدا شده و بمنظور ترسیب ترکیب وانادیم دار از محلول، آماده میگردد. وانادیم پنج ظرفیتی در یک اسید رقیق در $E^0 = 1.0\text{V}$ بفرم کاتیون $(\text{VO}_2)^+$ بوده و عامل اکسیدان قوی محسوب می شود ولی در یک محلول سوزآور رقیق در $E^0 < 0\ \text{V}$ بصورت آنیونهای $(\text{V}_2\text{O}_7)^{4-}$ و $(\text{VO}_4)^{3-}$ درآمده و عامل اکسیدان متوسط است. در محدوده pH ۱۲-۲، وانادیم (V) بصورت چند آنیونیهای^۲ پلیمر شده نظیر دکا وانادات $(\text{V}_{10}\text{O}_{28})^{6-}$ یا متاوانادات $(\text{V}_4\text{O}_{12})^{4-}$ در خواهد آمد [۷]. وانادیم از محلول می تواند بفرم یکی از ترکیبات اسید وانادیک، متا وانادات آمونیوم یا پلی وانادات های آمونیوم رسوب نماید. رسوب وانادیم بفرم ترکیب قهوه ای رنگ اسید وانادیک ناخالص در pH حدود ۲ تشکیل می شود که دارای فرمول شیمیائی $\text{V}_2\text{O}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ بوده و به کیک قرمز معروف است. کیک قرمز معمولاً دارای مقدار قابل ملاحظه ای سدیم میباشد و ترکیب آن نزدیک به $\text{Na}_2\text{H}_2\text{V}_6\text{O}_{17}$ میباشد. رسوب سفیدرنگ متا وانادات آمونیوم با فرمول شیمیائی NH_4VO_3 ، پس از حل سازی کیک قرمز در محلول سودا اش ۵٪ وزنی، تنظیم pH در محدوده ۸-۹ و اضافه کردن کلرید آمونیوم تشکیل می شود و تنها $0/52\ \text{g}$ از آن در $100\ \text{cc}$ آب 15°C قابلیت حل شدن دارد [۸]. پس از ترسیب نوبت به تکلیس و تجزیه حرارتی رسوبات میرسد. اسید وانادیک را میتوان جهت تولید پنتاکسید وانادیم با خلوص صنعتی حرارت داد که محصول متراکم و سیاه رنگ حاصل در حدود ۶-۱۰ wt.% Na_2O داشته و جهت کاربردهای متالورژیکی مناسب است. تجزیه حرارتی رسوب سفیدرنگ متاوانادات نیز از دمای 70°C آغاز و در دماهای بالاتر و تحت اتمسفر اکسیداسیونی، سریعاً به V_2O_5 تبدیل می شود. واکنش تکلیس متاوانادات سدیم مطابق رابطه ذیل است؛



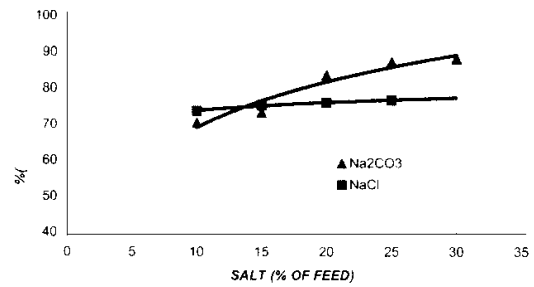
نتایج و بحث

نمودارهای ارائه شده در اشکال ذیل نتایج حاصل از آزمایش های مراحل تشویه نمکی و حل سازی را نشان

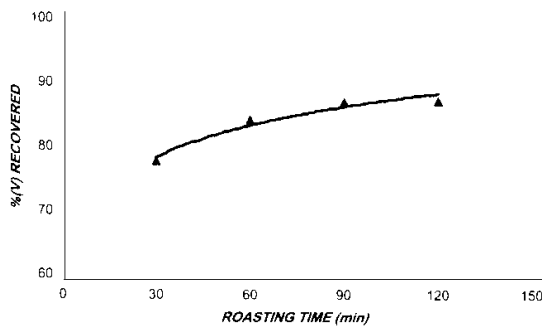
میدهند.



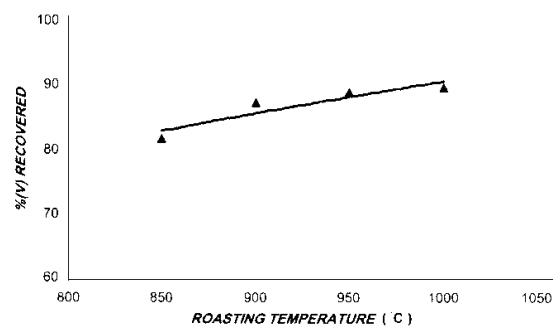
شکل ۲: اثر اندازه ذرات تغذیه کربنات و کلرید سدیم بر بازیابی V (غلظت نمک کربنات سدیم ۲۵٪، دمای تشویه کربناتی 900°C ، زمان تشویه ۲ ساعت)



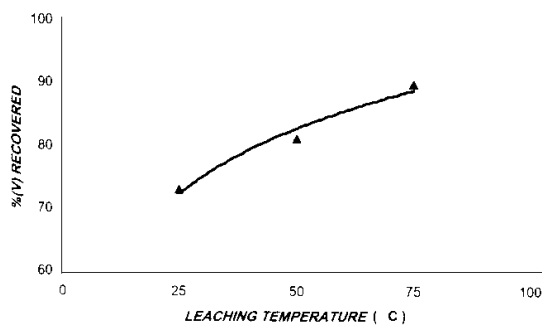
شکل ۱: اثر غلظت نمکهای کربنات و کلرید سدیم بر بازیابی V (اندازه ذرات $250\mu\text{m}$ ، دمای تشویه کربناتی 900°C ، دمای تشویه کلریدی 840°C ، زمان تشویه ۲ ساعت)



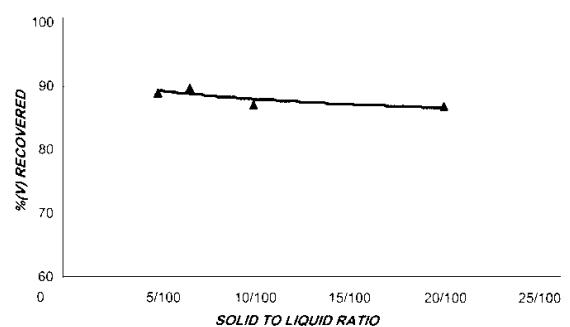
شکل ۴: اثر زمان عملیات تشویه بر بازیابی V از کاتالیزورهای مصرف شده (اندازه ذرات تغذیه $250\mu\text{m}$ ، غلظت نمک کربنات سدیم ۲۵٪، دمای تشویه کربناتی 900°C)



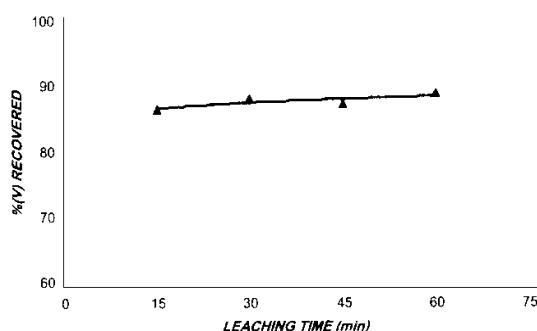
شکل ۳: اثر دمای عملیات تشویه بر بازیابی V از کاتالیزورهای مصرف شده (اندازه ذرات تغذیه $250\mu\text{m}$ ، غلظت نمک کربنات سدیم ۲۵٪، زمان تشویه ۲ ساعت)



شکل ۶: تاثیر دمای حل سازی بر درصد بازیابی V (نسبت جامد به مایع ۱ به ۲۰، زمان لیچینگ ۳۰ دقیقه، اندازه ذرات در حل سازی $250\mu\text{m}$)



شکل ۵: تاثیر S:L در حل سازی بر بازیابی V (دمای لیچینگ $75 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ، زمان لیچینگ ۳۰ دقیقه، اندازه ذرات در حل سازی $250\mu\text{m}$)

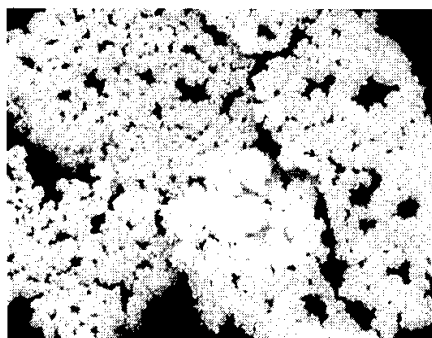


شکل ۷: تاثیر زمان حل سازی بر درصد بازیابی V

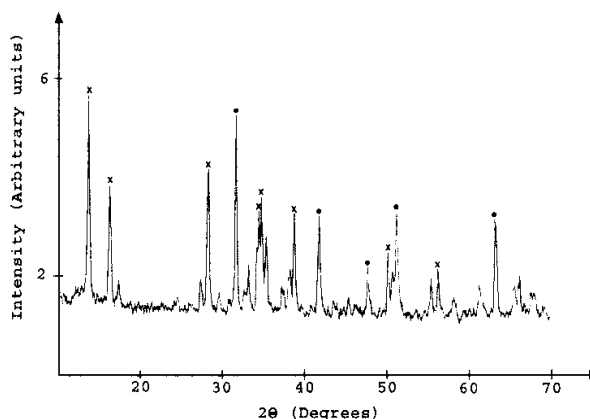
(دمای لیچینگ $75 \pm 2^\circ C$ ، نسبت جامد به مایع ۱ به ۲۰، اندازه ذرات در حل سازی $250 \mu m$ -)

منحنی های بدست آمده در اشکال ۱ الی ۴ نشان می دهند که افزایش غلظت نمک، راندمان بازیابی را افزایش داده و شیب منحنی بازیابی و انادیم برحسب تغییرات غلظت نمک کربنات سدیم از شیب این منحنی برای نمک کلرید سدیم تندتر است و درصد بازیابی و انادیم در عملیات تشویه توسط نمک کربنات سدیم تا ۱۱٪ بیشتر از بازیابی و انادیم در تشویه کلریدی می باشد. همچنین افزایش اندازه ذرات تغذیه، راندمان بازیابی را کاهش می دهد، افزایش دما تقریباً بطور خطی راندمان بازیابی را افزایش داده و افزایش زمان تشویه از ۳۰ به ۶۰ دقیقه بازیابی را در حدود ۷٪ افزایش می دهد. بر اساس نمودارهای اشکال ۵ الی ۷، بیشترین درصد بازیابی و انادیم در نسبت وزنی کلسین به آب معادل ۱ به ۱۵ بدست آمده است که این امر از آنجا که افزایش نسبت پالپ سبب کاهش سرعت حل سازی می شود، قابل تحلیل است. همچنین افزایش دمای حل سازی از دمای محیط به $75^\circ C$ راندمان بازیابی را به میزان ۲۰٪ افزایش داده است، لیکن گذشت زمان پس از ۱۵ دقیقه تغییر چندانی بر درصد بازیابی و انادیم بوجود نیاورده است.

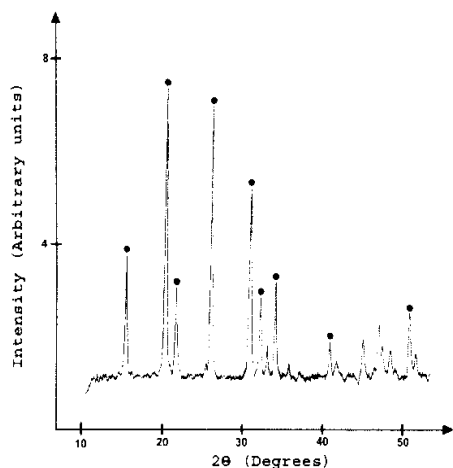
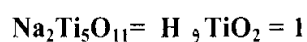
پس از حل سازی محصول تشویه در آب، قسمت اعظم کلسین در آب حل نشد و رسوب برنگ قهوه ای روشن در ته ظرف باقی ماند. شکل ۸ طرح منظم طیفها در نمودار پراش اشعه X از بخش حل نشده کلسین را نشان می دهد. حضور ترکیبات تیتانیوم در رسوب مذکور بیانگر کارآمدی روش تشویه در حذف Ti می باشد. شکل ۹ رسوب سفید رنگ متاوانادات آمونیوم را نشان می دهد. ترکیب نارنجی رنگ V_2O_5 در نتیجه حرارت دادن رسوب متاوانادات آمونیوم بمدت ۴۰ دقیقه و در دمای $400^\circ C$ بدست آمد (شکل ۱۰). نتایج آنالیز XRD و XRF نمونه پنتاکسید و انادیم بدست آمده به ترتیب در شکل ۱۱ و جدول ۲ قابل بررسی است.



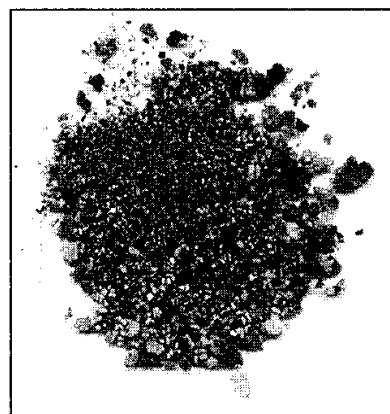
شکل ۹: رسوب متوانادات آمونیوم



شکل ۸: نمودار طیف XRD بخش باقیمانده از حل سازی کلسین در آب، ترکیبات تشخیص داده شده:



شکل ۱۱: نمودار طیف XRD پنتاکسید وانادیم حاصل



شکل ۱۰: پنتاکسید وانادیم حاصل از تکلیس

جدول ۲: نتیجه آنالیز XRF نمونه پنتاکسید وانادیم استحصال شده

Z	wt.%	StdErr	Z	wt.%	StdErr	Z	wt.%	StdErr
11 Na ₂ O	1.8	.07	17 Cl	<	-	26 Fe ₂ O ₃	.27	.02
12 MgO	.22	.02	19 K ₂ O	.022	.003	29 CuO	<	-
13 Al ₂ O ₃	.063	.02	20 CaO	.055	.0005	30 ZnO	<	-
14 SiO ₂	.63	.03	22 TiO ₂	.24	.02	40 ZrO ₂	<	-
15 P ₂ O ₅	.25	.02	23 V ₂ O ₅	95.4	.1	41 Nb ₂ O ₅	<	-
16 SO ₃	.98	.04	25 MnO	.027	.004	82 PbO	<	-

نتیجه گیری

۱- راندمان بهینه بازیابی وانادیم در عملیات تشویه نمکی بازاء مقدار نمک کربنات سدیم معادل ۲۵٪ وزن ماده اولیه، اندازه ذرات ماده اولیه ۲۰۰ μm، دمای ۹۵۰ °C و زمان ۹۰ دقیقه بدست می آید.

- ۲- بیشترین درصد بازیابی وانادیم از پوشش کاتالیزورها پس از حل‌سازی کلسین در آب در دمای 75°C با نسبت جامد به مایع معادل ۱ به ۱۵ و زمان حل‌سازی معادل ۳۰ دقیقه بدست می‌آید.
- ۳- تشویه کربناتی و حل‌سازی کلسین در آب، روش مناسب جهت حذف ناخالصی‌های موجود در پوشش کاتالیزور نظیر تیتانیوم و آهن می‌باشد چراکه ترکیبات تیتانات و فرات سدیم و نیز اکسیدهای این عناصر در آب نامحلولند و در فرآیند اولیه حل‌سازی ($\text{pH}=11$) ته نشین شده و جدا می‌گردند. تیتانیوم در رسوب به فرم ترکیبات TiO_2 ، $\text{Na}_2\text{Ti}_5\text{O}_{11}$ و $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ باقی می‌ماند.
- ۴- ناخالصی‌های Ca و Mg در آب هیدرولیز شده و بفرم $\text{Ca}(\text{OH})_2$ و $\text{Mg}(\text{OH})_2$ رسوب می‌نمایند. مس نیز در فرآیند حل‌سازی کلسین در آب بفرم ترکیب نامحلول Cu_2O یا $\text{Cu}(\text{OH})_2$ رسوب می‌نماید.
- ۵- سیلیسیم که بصورت نمک سیلیکات سدیم در آب حل میشود در $\text{pH}=8/5$ بفرم H_2SiO_3 رسوب می‌نماید و Al موجود در محلول با تنظیم pH در محدوده $5/5-6/5$ بفرم $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ته نشین شده و جداسازی می‌گردد.
- ۶- در $\text{pH} 6$ و بالاتر، یون وانادیم با یونهای سایر اسیدها نظیر فسفات‌ها و سیلیکات‌ها که پس از حل‌سازی کلسین وارد محلول شده‌اند، تشکیل کمپلکس داده و بطور مشترک رسوب می‌نمایند که بعنوان مثال می‌توان به ترکیب $11\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{P}_2\text{O}_5 \cdot 24\text{V}_2\text{O}_5$ اشاره نمود که تشکیل آن محتمل بوده و سبب اتلاف وانادیم در فرآیند تصفیه می‌گردد.
- ۷- در عملیات تشویه در حضور نمک کربنات سدیم سیلیکات‌های شیشه‌ای وانادیم تشکیل می‌شوند که اتلاف وانادیم را به‌مراه دارد. همچنین حضور آهن و آلومینیوم به‌مراه Si در پوشش کاتالیزور سبب بوجود آمدن کمپلکس‌های سیلیکات وانادیم غیرقابل حل در آب شده و موجب اتلاف V می‌گردد.
- ۸- Ca موجود در ماده خام از یک سو پس از تشویه کربناتی با وانادیم تشکیل وانادات کلسیم داده و اتلاف وانادیم را سبب می‌شود و از سوی دیگر با سیلیسیم واکنش داده و پس از حل‌سازی با تشکیل رسوب $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ اثر مزاحم سیلیسیم را کاهش می‌دهد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از جناب آقای دکتر جان زاده و آقایان مهندس بابائی، مهندس طاهری، مهندس میناسیان، مهندس پناهی و پرسنل زحمتکش دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف بسبب همکاری‌های ارزشمندشان، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- 1- F. Habashi, Handbook of Extractive Metallurgy, 1997, Germany, Wiley-VCH.
- 2- Arne Anderson, Adsorption and Catalysis on Oxide Surfaces, 1985, Elsevier science publishers.
- 3- G. Gabra, I. Malinsky, "A Comparative Study of the Extraction of Vanadium from Titaniferous Magnetite and Slag", Paper presented at the 110th AIME Meeting, Chicago, Illinois, February 22-26, 1981, p. 167.
- 4- Krik. Othmer, Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd Edition, Vol. 23, 1978, John wiley & sons, Inc.

- 5- Robert C. Weast, Handbook of Chemistry and physics, 57th Edition, 1976, CRC Press, Inc.
- 6- Marcel Pourbaix, Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, Translated by J. A. Franklin, 2nd Edition, 1974, Houston, Texas, National Association of Corrosion Engineers.
- 7- E. M. Ho, J. Kyle, S. Lallence, D. M. Muir, A. J. Parker, "Recovery of Vanadium from Spent Catalysts and Alumina Residues", Research Center in Hydrometallurgy, Murdoch University, Perth, Western Australia, p. 1105.
- 8- C. Giavarini, "Recovery of Vanadium from Ash-Leaching Solutions by Solvent Extraction", Fuel, 1982, p. 549.