بررسی اثر دما و غلظت نیتریک‌اسید بر نرخ تبخیر پسماند شبیه‌سازی‌شده HLLW

INC29-1185

زهرا فرحزادی[۱]، فاضل ضحاکی فر[۲]، محمد صمدفام[۱]، پریسا ظاهری [۲]

۱. دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی ۱۱۳۶۵-۸۶۳۹، تهران، ایران.

۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، صندوق پستی ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران، ایران

چکیده:

جهت تثبیت پسماندهای HLLW در شیشه نیاز است که عناصر به فرم اکسیدی خود باشند. لذا ضروری است پسماند تبخیر شده و به فرم جامد در آید تا در ادامه داخل کوره کلسیناسیون عناصر به فرم اکسیدی تبدیل شوند. پس یکی از چالش‌های تثبیت، بهینه‌سازی شرایط تبخیر است. در این پژوهش با استفاده از اندازه گیری‌های آزمایشگاهی اثر دما (°C 110 تا ۱۸۰) و غلظت نیتریک‌اسید (mol/L 5/0 تا ۴) به عنوان دو پارامتر فرایندی مهم بر تبخیر پسماند مایع شبیه‌سازی‌شده (HLLW) بررسی شد. نتایج نشان داد نرخ تبخیر به دما وابسته است و با افزایش دما تبخیر بهتر و زمان تبخیر کاهش می‌یابد و تغییر غلظت نیتریک‌اسید تاثیر کمی بر روند تبخیر پسماند شبیه‌سازی‌شده HLLW دارد. منحنی‌های جرم-زمان نشان دادند که روند تبخیر محلول پسماند شبیه‌سازی‌شده HLLW شامل دو ناحیه تبخیر محلول و خشک‌شدن ماده خمیری شکل است که بیشترین مقدار نرخ تبخیر در ناحیه تبخیر محلول اتفاق می‌افتد. همچنین نرخ تبخیر در شروع فرایندکه افزایش دما چشمگیر است بیشترین مقدار است و ثابت گردید، تغییرات دما اثر به مراتب بیشتری نسبت به غلظت نیتریک اسید دارد.

.کلیدواژه‌ها: تبخیر، پسماند مایع شبیه‌سازی‌شده HLLW، دما، غلظت نیتریک اسید.

Study the effect of temperature and nitric acid concentration on the evaporation rate of simulated high-level liquid waste (HLLW)

Z. Farahzadi[1], F. Zahakifar[2], M. Samadfam[1], P. Zaheri[2]

1. Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O. Box 11365-8639, Tehran, Iran

2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 11365-8486 Tehran- Iran.

Abstract:

To stabilize the high-level liquid waste in the glass, it is necessary that the elements are in their oxide form. Therefore, it is necessary to evaporate the waste and turn it into a solid form so that the elements can be converted into an oxide form in the calcination furnace. So, one of the challenges of stabilization is to optimize the evaporation conditions. In this research, using laboratory measurements, the effect of temperature (110 to 180 °C) and nitric acid (0.5 to 4 mol/L) as two important processes on the evaporation of simulated HLLW was investigated. The results showed that shows that the evaporation rate is dependent on the temperature and with the increase of the temperature, the evaporation is better and the evaporation time decreases, and the change of nitric acid has little effect on the evaporation process of the simulation HLLW. The mass-time curves showed that the evaporation process of the simulated high liquid waste includes two areas of solution evaporation and drying of the paste-like material, where the highest amount of evaporation rate occurs in the solution evaporation area. Also, the evaporation rate at the beginning of the temperature increase process is significant, which is the highest value, the temperature changes are more proportional to the amount of nitric acid.

Keywords: Evaporation, Simulated High-level liquid waste, Temperature, Nitric acid concentration

۱. مقدمه

پسماندهای مایع با پرتوزایی سطح بالا[1] از ترکیب پیچیده‌ای از عناصر پرتوزا (محصولات شکافت، آکتینیدهای جزئی) و عناصر غیرپرتوزا تشکیل شده است. این مواد حاوی هسته‌های پرتوزا با عمر طولانی (و یا محصولات دختر با عمر طولانی) می‌باشند که نیمه‌عمرشان می‌تواند به بیش از هزاران تا میلیون‌ها سال برسد [۱]. بنابراین ضروری است که پسماندهای مایع با پرتوزایی سطح بالا در یک ماتریس مناسب تثبیت شوند.

فرایند تثبیت پسماند پرتوزا فرایندی است که در آن پسماندهای پرتوزا به شکل جامد تبدیل می‌گردند تا جابجایی، انبارش و دفع آن‌ها به‌طور ایمن و مناسب انجام شود. بدین ترتیب خطر رهاسازی هسته‌های پرتوزا به محیط‌زیست کاهش می‌یابد.. امروزه یکی از ایمن‌ترین روش‌های تثبیت پسماندهای با پرتوزایی بالا روش تثبیت در ماتریس شیشه می‌باشد. که از بین ماتریس‌های شیشه‌ای ماتریس شیشه بوروسیلیکات به علت حجم کوچک فرم پسماند نهایی، توانایی تثبیت تعداد زیادی از عناصر پسماند در ساختار آزاد شیشه و پایداری بالای ماتریس‌های شیشه، بسیار مطلوب است [۲].

تثبیت عناصر در ماتریس شیشه بوروسیلیکات نیاز است که عناصر به فرم اکسیدی خود باشند. برای این منظور ضروری است که در ابتدا پسماند تبخیر شده و به فرم جامد در آید تا در ادامه در کوره کلسیناسیون عناصر به فرم اکسیدی در آیند. این امر نیازمند بهینه سازی شرایط خشکسازی است تا یکی از چالشهای اصلی تثبیت در شیشه حل شود [۳, ۴].

تثبیت در شیشه معمولاً به دو صورت فرآیند یک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای قابل انجام است. در فرآیند تثبیت در شیشه یک‌مرحله‌ای، افزودنی‌های ایجادکننده شیشه با پسماندهای مایع تغلیظ‌شده مخلوط گشته و به‌این‌ترتیب پیمانه‌ی مواد به‌وجود آورنده شیشه ایجاد می‌شود. مواد این پیمانه سپس به داخل ذوب‌کن تغذیه می‌شود که در آن‌جا ابتدا فرآیند تبخیر اتفاق می‌افتد، و سپس با تکلیس و ذوب شدن شیشه ادامه می‌یابد. بدین ترتیب در فرآیند یک‌مرحله‌ای، ذوب کردن و تکلیس پسماند هر دو در داخل ذوب‌کن انجام می‌گیرد. در فرآیند تثبیت در شیشه دومرحله‌ای، پسماند قبل از ورود به ذوب‌کن، به داخل کلسیناتور و یا تبخیرکننده تغذیه می‌شود. سپس افزودنی‌های ایجادکننده شیشه (معمولاً به‌صورت خمیر شیشه) همراه با پسماند تکلیس‌شده به داخل ذوب‌کن تغذیه می‌شوند [۵].

به دلیل سطح پرتوزایی بالای پسماند، مواجه شدن با مشکلات تعمیر و نگهداری کلسیناتور موردنظر باید دارای ساده‌ترین طراحی و حداقل تعداد قطعات متحرک باشد تا نگهداری و تعویض قطعات به‌راحتی انجام شود. مطابق بررسی‌ها، کلسیناسیون در کوره دوار، به دلیل پیچیدگی‌های کمتر نسبت به سایر کوره‌ها و تولید پسماندهای ثانویه سطح بالای کمتر، انتخاب بهتری است [۶]. در ابتدای کوره دوار، پسماند مایع وارد شده و پس از تبخیر کامل، پودر حاصل شده مسیر کوره را طی کرده و کلسینه می شود. با توجه به ناحیه‌بندی دمایی کوره‌ها، دمای ابتدای کوره کمتر از دمای کلسیناسیون است (کمتر از ۲۰۰ °C). لذا ضروری است سینتیک تبخیر پسماند در ابتدای کوره در دماهای کمتر از ۲۰۰ °C بررسی شود تا زمان مورد نیاز تبخیر و اندازه ناحیه تبخیر کوره محاسبه شود. هدف از پژوهش حاضر بررسی اثرات دمای تبخیر و غلظت نیتریک‌اسید بر سینتیک تبخیر پسماند مایع شبیه‌سازی‌شده HLLW بوده است. در این تحقیق با توجه به جدول ۱ یک نمونه پسماند مایع شبیه‌سازی‌شده HLLW تهیه شد و مطالعات سینتیکی بر روی آن انجام گرفت.

جدول ۱. ترکیب درصد اکسیدی پسماند **HLW** شبیه‌سازی‌شده غیرپرتوزا.

اجزای پسماند HLW	مقدار (درصد وزنی)	اجزای پسماند HLW	مقدار (درصد وزنی)
SeO_2	۱/۱	Na_2O	۲۰

[1]High level liquid wastes (HLLW)

Cs_2O	۵/۳۵	BaO	۳
SrO	۱/۷	Ce_2O_3	۶
Y_2O_3	۱	Pr_2O_3	۲/۵
ZrO_2	۱۲	Nd_2O_3	۱۲
MoO_3	۸/۵	La_2O_3	۴/۷۵
MnO_2	۱/۷۵	Fe_2O_3	۱۴
Ag_2O	۰/۱۵	NiO	۲
CdO	۰/۲۰	Cr_2O_3	۲/۵
SnO_2	۰/۲۰	P_2O_5	۱/۳

۲. روش کار

۱,۲ مواد و تجهیزات

مواد مورد نیاز: سدیم مولیبدات، نئودمیم اکسید، استرانسیم نیترات، ایتریم نیترات، آهن نیترات، سدیم نیترات، سزیم نیترات، منگنز نیترات، نیکل نیترات از شرکت Merck , زیرکونیم نیترات، پرازئودمیم نیترات، کروم نیترات، سریم نیترات، باریم نیترات از شرکت SIGMA-ALDRICH , لانتانیم اکسید از شرکت CDH تهیه شد.

تجهیزات و دستگاه‌های مورد نیاز: برای تبخیر از آون آزمایشگاهی مدل ۴۴-۱۱۰۳-۱۲-۹۷ استفاده شد (خریداری شده از شرکت بهداد). برای اندازه گیری وزن از ترازو آزمایشگاهی دیجیتالی مدل M254Ai استفاده شد (خریداری شده از شرکت BEL).

۲,۲ شیوه انجام آزمایش‌ها

برای تهیه محلول شبیه سازی شده جهت بررسی اثر دما، مواد شامل سدیم مولیبدات، نئودمیم اکسید، استرانسیم نیترات، ایتریم نیترات، آهن نیترات، سدیم نیترات، سزیم نیترات، منگنز نیترات، نیکل نیترات, زیرکونیم نیترات، پرازئودمیم نیترات، کروم نیترات، سریم نیترات، باریم نیترات و لانتانیم اکسید طبق ترکیب درصد HLLW شبیه‌سازی‌شده راکتور بوشهر، در ۲۰۰ mL محلول ۱ mol/L نیتریک‌اسید حل گردید و سپس در دستگاه اولتراسونیک قرار داده شد و محلول یکنواختی به‌دست آمد.

برای تهیه محلول شبیه‌سازی‌شده جهت بررسی اثر غلظت نیتریک‌اسید مواد نامبرده شده طبق ترکیب درصد HLLW شبیه سازی شده راکتور بوشهر، در حجم‌های ۳۰ mL در محلول‌های ۰/۵ mol/L، ۱، ۲، ۴ نیتریک‌اسید حل گردید و سپس در دستگاه اولتراسونیک قرار داده شد و محلول یکنواختی به دست آمد.

برای انجام آزمایش‌های تبخیر محلول شبیه سازی شده در یک بشر مدرج ریخته شد و دماسنج داخل بشر قرار گرفت. برای بررسی سینتیک تبخیر هر ده دقیقه یک‌بار بشر از آون خارج گردید و پارامترهای دما، جرم و حجم محلول اندازه‌گیری شد.

۳.بحث و نتایج

۱,۳. بررسی اثر دما بر سینتیک تبخیر پسماند مایع شبیه‌سازی‌شده HLLW

جهت بررسی اثر دما بر سینتیک تبخیر محلول HLLW، دمای آزمایش (آون) روی دماهای مختلف (°C ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۰ ، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰) تنظیم می‌گردد که غلظت نیتریک‌اسید در تمامی نمونه‌ها ۱ mol/L است. نتایج بررسی این اثر در شکل‌های ۱ تا ۴ ارائه شده است.

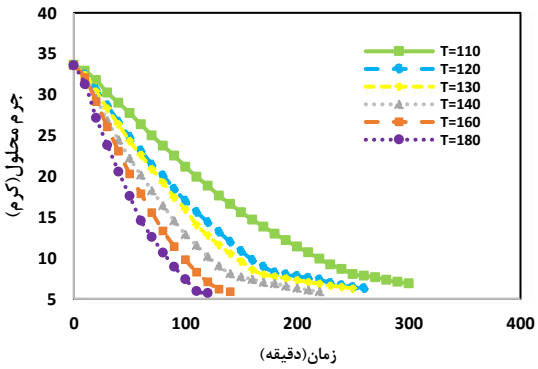
مطابق شـــکل ۱ با افزایش دما از ۱۱۰°C به ۱۸۰ جرم محلول کاهش می‌یابد که به دلیل افزایش نرخ تبخیر محلول با افزایش دما اســـت (شـــکل۲). با افزایش زمان آزمایش در همه‌ی محلول‌ها جرم مطابق انتظار کاهش پیدا کرده اســـت. منحنی جرم-زمان برای تمامی دماها کاملا هموار بوده و این به علت طولانی بودن زمان خشـــک‌شـــدن و پایین بودن نوسان به‌وجود آمده در توزین است [۷]. در منحنی جرم_زمان یک ناحیه کاهشی با شیب زیاد و یک ناحیه پلاتو وجود دارد که هرچه دمای آزمایش بیشـــتر می‌شـــود ناحیه پلاتو کاهش می‌یابد. ناحیه اول مربوط به تبخیر[1] محلول بوده و ناحیه دوم مربوط به تبخیر آب باقیمانده از رسوبات است که ناحیه دوم ناحیه خشک‌کردن[2] نامیده می‌شود [۸, ۹].

اندازه‌گیری دمای محلول برای تمامی آزمایش‌ها با استفاده از یک دماسنج در داخل محلول انجام شد. نتایج نشان داد دمای محلول ساخته شده در مدت زمان ۲۰ دقیقه به دمای مشخصی می‌رسد و سپس روند تقریبا ثابتی را (که بخش عمده‌ای از فرایند تبخیر است) طی می‌کند. این روند ثابت تا زمانی که نمونه به صورت محلول است ادامه داشته و در نهایت به دلیل خمیری شدن نمونه دما به طور ناگهانی افزایش می‌یابد.

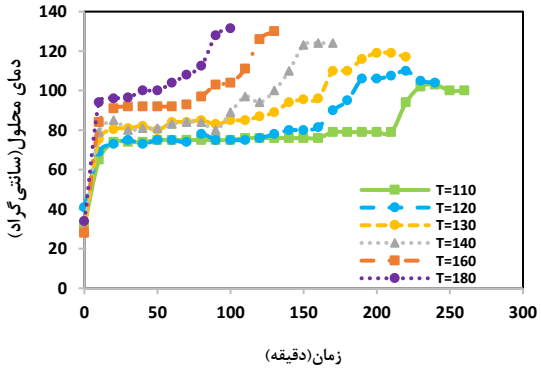
با افزایش دمای آزمایش زمان تبخیر کاهش می‌یابد به گونه‌ای که کل روند تبخیر در دمای آزمایش ۱۸۰°C در کمتر از ۱۳۰ دقیقه اتفاق می‌افتد. این در حالی است که این میزان تبخیر در دمای۱۱۰°C بیش از ۳۰۰ دقیقه طول می‌کشد. به طور مثال در دماهای ۱۱۰°C و ۱۸۰، در مدت زمان ۶۰ دقیقه به ترتیب ۲۱ و ۵۶ درصد از جرم محلول کاهش یافت. همچنین با افزایش دمای آزمایش از ۱۱۰°C به ۱۸۰ دمای نهایی نمونه خمیری شکل ۳۱,۵°C افزایش پیدا می‌کند که باعث کاهش بیشتر میزان رطوبت نمونه می‌شود [۱۰].

با استفاده از منحنی جرم-زمان، نرخ تغییرات انتقال جرم تعیین گردید که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. در ابتدا تغییرات نرخ انتقال جرم زیاد می‌شـــود که به دلیل افزایش دمای ناگهانی محلول از دمای محیط به دمای آون می‌باشـــد. در ادامه علی‌رغم این‌که دما افزایش می‌یابد به مرور تغییرات نرخ انتقال جرم کاهش می‌یابد زیرا نســـبت مایع موجود در محلول کم می‌شـــود، ســـطح تماس مایع با هوا کم شـــده و جدا شـــدن مولکول‌های مایع از محلول ســـخت‌تر می‌شود و در نهایت تغییرات نرخ کمتر می‌شود. هرچه دمای آون بیش‌تر باشد نقطه بیشینه نمودار بیشتر است [۱۰].

کاهش جرم، ناشی از تبخیر آب و تولید گازهای ناکس[3] است. لازم به‌ذکر است که اکسیدهای نیتروژن با نام‌های اکسید ازت یا ناکس یکی از گازهای خطرناک خروجی از صنایع پتروشیمی و سایر صنایع هستند. نیتریک‌اسید به عنوان یک منبع مهم تولید گازهای ناکس شناخته می شود که در آزمایش‌های این پژوهش نیز به دلیل وجود نیتریک‌اسید در دماهای بالاتر از ۷۰ درجه، تولید این گاز اجتناب‌ناپذیر است [۱۱]. نتایج به دست آمده در شکل ۴ نشان می‌دهد که به مرور زمان نسبت جرم به حجم افزایش پیدا می‌کند، بدیهی است که با گذشت زمان چگالی افزایش می‌یابد.

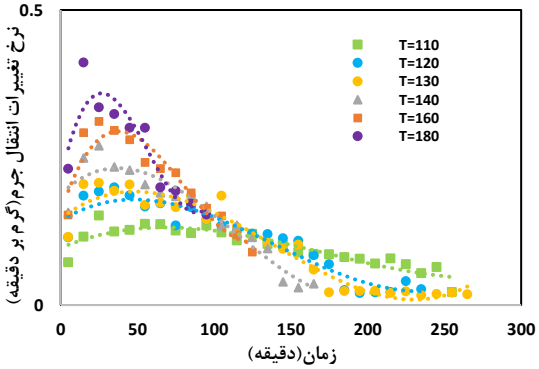


شکل ۱. اثر دمای آزمایش بر تغییرات جرم محلول پسماند شبیه‌سازی‌شده HLLW با زمان در غلظت 1 mol/L HNO_3.

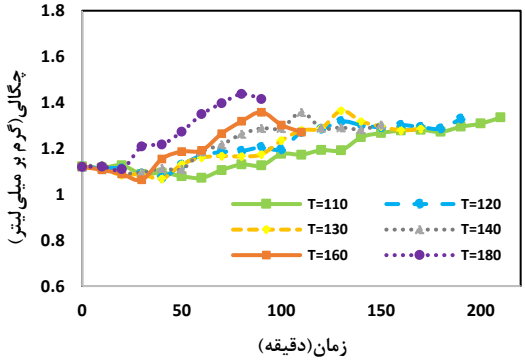


شکل ۲. اثر دمای آزمایش بر تغییرات دمای محلول پسماند شبیه‌سازی‌شده HLLW با زمان در غلظت 1 mol/L HNO_3 .

[1]Evaporation
[2]Drying
[3]NOx



شکل ۳. اثر دمای آزمایش بر نرخ تغییرات انتقال جرم محلول پسماند شبیه‌سازی‌شده HLLW با زمان در غلظت 1 mol/L HNO_3.



شکل ۴. اثر دمای آزمایش بر تغییرات چگالی محلول پسماند شبیه‌سازی‌شده HLLW با زمان در غلظت 1 mol/L HNO_3.

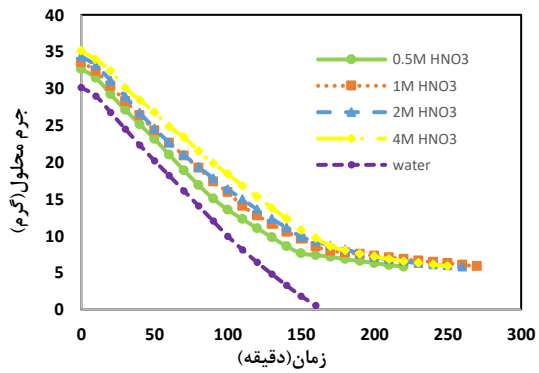
۲,۳. بررسی اثر غلظت نیتریک‌اسید بر سینتیک تبخیر پسماند مایع شبیه‌سازی‌شده HLLW

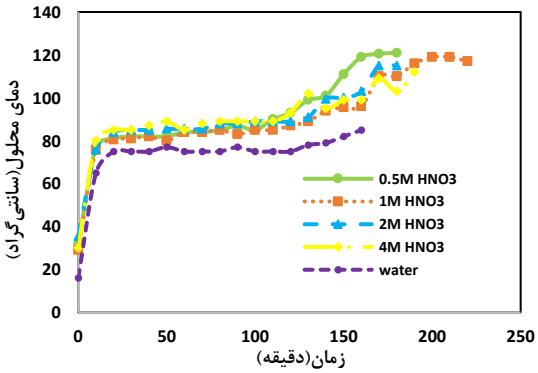
با توجه به اینکه پسماندهای HLLW با غلظت‌های مختلفی از نیتریک‌اسید وجود دارند، در این قسمت اثر غلظت نیتریک‌اسید بر نرخ تبخیر بررسی شد. برای بررسی اثر این فاکتور، محلول‌هایی با غلظت یکسان از نمک‌های موجود در پسماند و در غلظت‌های مختلف (۰٫۵ mol/L، ۱، ۲، ۴) از نیتریک‌اسید ساخته شد. به منظور مقایسه بهتر نتایج، نرخ تبخیر برای یک نمونه آب مقطر (بدون هیچ‌گونه نمک و افزودنی) نیز اندازه گیری شد.

نتایج بررسی تاثیر غلظت نیتریک‌اسید در دمای۱۳۰°C طبق نمودارهای شکل ۵ تا ۸ می باشد. نتایج به دست آمده از منحنی جرم-زمان (شکل ۵) نشان می‌دهد با افزایش غلظت نیتریک‌اسید از ۱ mol/L تا ۴، زمان تبخیر و ناحیه پلاتو (ناحیه خشک‌کردن) کاهش ناچیزی دارد. ولی محلول با غلظت ۰٫۵ mol/L زمان تبخیر کوتاه‌تری نسبت به سایر محلول‌ها با غلظت‌های بالاتر دارد که این مسئله ناشی از تفاوت جرم ملکولی آب و نیتریک‌اسید است. به طور مثال در زمان ۱۵۰ دقیقه کاهش جرم در محلول با غلظت‌های ۰٫۵ mol/L، ۱، ۲، ۴ به ترتیب ۷۶، ۷۰، ۷۱، ۶۹ درصد است.

تغییرات غلظت نیتریک‌اسید تاثیر چندانی بر روند تغییر دمای محلول ندارد. در مورد غلظت‌های ۱ mol/L، ۲، ۴ محدوده تغییرات دما در ناحیه تبخیر از ۸۰°C تا ۱۰۳ و در ناحیه خشک‌کردن از ۱۰۳ °C تا ۱۱۷ است. در محلول با غلظت ۰٫۵ mol/L محدوده تغییرات دما در ناحیه تبخیر مشابه سایر غلظت‌ها است ولی در ناحیه خشک‌کردن تغییرات دما از ۹۹٫۵ °C تا ۱۲۱ است که نسبت به سایر غلظت‌ها ۴ °C افزایش دما داشته که ناشی از اختلاف دمای جوش میان آب و نیتریک‌اسید است.

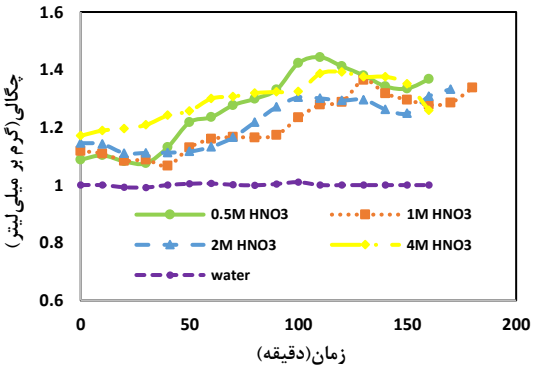
محدوده تغییرات چگالی محلول با غلظت‌های ۱ mol/L، ۲، ۴ نیتریک اسید بین ۱٫۰۶تا ۱٫۳۹ گرم بر میلی‌لیتر می‌باشد ولی در مورد محلول حاوی ۰٫۵ mol/L نیتریک‌اسید تغییرات چگالی بین ۱٫۰۷ تا ۱٫۴۴ گرم بر میلی‌لیتر که از سایر غلظت‌ها بیشتر است.



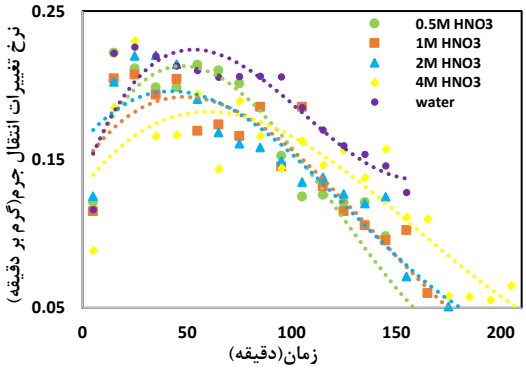


شکل ۶. اثر غلظت HNO_3 بر تغییرات دمای محلول پسماند شبیه‌سازی‌شده HLLW با زمان در دمای آزمایش ۱۳۰ °C.

شکل ۵. اثر غلظت HNO_3 بر تغییرات جرم محلول پسماند شبیه‌سازی‌شده HLLW با زمان در دمای آزمایش °C ۱۳۰.



شکل ۷ . اثر غلظت HNO_3 بر تغییرات چگالی محلول پسماند شبیه‌سازی‌شده HLLW با زمان در دمای آزمایش °C ۱۳۰.



شکل ۸. اثر غلظت HNO_3 بر نرخ تغییرات انتقال جرم محلول پسماند شبیه‌سازی‌شده HLLW با زمان در دمای آزمایش °C ۱۳۰.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت نرخ تبخیر در فرایند کلسیناسیون پسماند HLLW جهت تثبیت در شیشه، در این پژوهش اثر دما (در محدوده °C ۱۱۰ تا ۱۸۰) و غلظت نیتریک اسید (در محدوده mol/L ۰/۵ تا ۴) بر فرایند تبخیر بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش دمای آزمایش نرخ انتقال جرم افزایش می‌یابد و بیشترین تغییرات نرخ مربوط به ناحیه تبخیر است به طوری که در زمان ابتدایی نرخ تغییر جرم برای محلول پسماند شبیه‌سازی‌شده HLLW در دمای آزمایش°C۱۸۰ ، ۱۴۰ و ۱۱۰ به ترتیب ۰/۲۳۰۷، ۰/۱۵۷ و ۰/۰۷۲۵ گرم بر دقیقه است که نشان می‌دهد با افزایش دما از °C ۱۱۰ به ۱۴۰ و از °C ۱۱۰ به ۱۸۰ نرخ تغییرات جرم در زمان ابتدایی به ترتیب بیش از ۲درصد و بیش از ۳ درصد افزایش می‌یابد.

در بررسی اثر غلظت نیتریک‌اسید بر روند تبخیر محلول شبیه‌سازی‌شده HLLW نتایج نشان داد که غلظت‌های مختلف نیتریک‌اسید تاثیر چندانی بر روند تبخیر محلول فوق ندارند طبق مقایسه‌ها در زمان ابتدایی نرخ تغییرات جرم برای محلول پسماند شبیه‌سازی‌شده HLW در غلظت‌های mol/L ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و آب مقطر به ترتیب ۰/۱۲۱۳، ۰/۱۱۵، ۰/۱۲۵، ۰/۱۱۸۶ و ۰/۱۱۶ گرم بر دقیقه است که نشان می‌دهد تغییرات غلظت تاثیر چندانی بر نرخ تغییرات انتقال جرم ندارد.

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت تماس و شرکت پسمانداری هسته‌ای ایران که این پروژه را حمایت مالی نمودند کمال تشکر و قدردانی نمایند.

۶. مراجع

1. Turlay, R., *Les déchets nucléaires (1997)*. 2012: EDP Sciences.
2. Ojovan, M.I., *Handbook of advanced radioactive waste conditioning technologies*. 2011: Elsevier.
3. STANDARDISATION, U.I.C.O., et al., *CR9164 QUALITY CONTROL AND MANAGEMENT LTPC IN CERAMIC INDUSTRIES 3 0 0 3 AIM*. UNIVERSITY DEPARTMENTS ANNA UNIVERSITY CHENNAI: CHENNAI 600 025 REGULATIONS-2009 CURRICULUM I TO IV SEMESTERS (FULL TIME) M. TECH. CERAMIC TECHNOLOGY: p. 26.
4. Agency, I.A.E., *Classification of Radioactive Waste: A Safety Guide*. 1994, IAEA Vienna.

5. Varshneya, A.K., *Flat Glass.* Fundamentals of Inorganic Glasses", Academic Press, Inc., Boston, 1994: p. 534-540.
6. Sevigny, G., *Letter report: Evaluation of dryer/calciner technologies for testing*. 1996, Pacific Northwest Lab.
7. *Rahmati, M., et al., Determining the characteristics and kinetic parameters of picrite explosive drying and designing a continuous dryer. Technical Faculty Publication, 2004. 38 . (In Persian).*
8. Krasnikov, V., *The Methods of Analysis and Calculation of Drying Kinetics, Drying'80*. 1980, . S. Mujundar, Hemisphere Publishing Corporation.
9. Kemp, I.C., et al., *Methods for processing experimental drying kinetics data.* Drying technology, 2001. **19**(1): p. 15-34.
10. *Hamid, Kh., et al., Studying the kinetics and energy consumption of white mulberry drying in a microwave dryer. (In Persian).*
11. Svensson, R. and E. Ljungström, *A kinetic study of the decomposition of HNO_3 and its reaction with NO.* International journal of chemical kinetics, 1988. **20**(11): p. 857-866.