

# Investigation of Aluminum Recycling from Urban Waste Using the Salt Flux Method

Alireza Peikar<sup>1</sup>, Erfan Abdollahzade<sup>2</sup>, Alireza Hemmati<sup>3\*</sup>, Amin Bazyari<sup>4</sup>

1-Bsc Student of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Iran University of Science and Technology

2- Bsc Student of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Iran University of Science and Technology

3- Associate Professor of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Iran University of Science and Technology

4-Assistant Professor of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Iran University of Science and Technology

**Email : alireza\_hemmati@iust.ac.ir**

## ***Abstract***

Recycling aluminum from urban waste is a crucial method for reducing energy consumption and preserving the environment. The extraction of aluminum from bauxite is not only costly but also generates significant environmental pollutants. In contrast, recycling aluminum through the remelting of scrap, particularly beverage cans, can reduce the need for raw material extraction while consuming up to 95% less energy. This study examines the aluminum recycling process using the salt flux method. The effects of parameters such as temperature, salt composition in the flux, mixing conditions, and scrap shape on recycling efficiency and aluminum purity were evaluated. The results showed that at 900°C, with a flux composition of 70% sodium chloride and 27% potassium chloride, in the presence of argon gas and proper mixing, the purity of the recovered aluminum reached 98.05%. Reducing the temperature to 800°C significantly lowered energy consumption while having minimal impact on the final product's purity. Additionally, compacted scrap exhibited a higher recycling yield compared to sheet-like scrap. The findings of this study indicate that the use of salt flux not only enhances the recycling process and reduces slag formation but also presents an economical and environmentally friendly solution for industrial-scale aluminum recycling.

***Keywords:* Aluminum, Aluminum recycling, Salt flux, The environment**

# بررسی بازیافت آلومینیوم از ضایعات شهری با استفاده از روش گداز آور نمکی

علیرضا پیکار<sup>۱</sup>، عرفان عبدالله زاده<sup>۲</sup>، علیرضا همتی<sup>۳\*</sup>، امین بازیاری<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۴- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

پیام نگار : [alireza\\_hemmati@iust.ac.ir](mailto:alireza_hemmati@iust.ac.ir)

## چکیده

بازیافت آلومینیوم از ضایعات شهری، یکی از روش‌های مهم برای کاهش مصرف انرژی و حفظ محیط زیست است. فرآیند استخراج آلومینیوم از بوکسیت، علاوه بر هزینه بالا، آلاینده‌های محیطی زیادی تولید می‌کند. از سوی دیگر، بازیافت آلومینیوم از طریق ذوب مجدد ضایعات، به‌ویژه قوطی‌های نوشیدنی، می‌تواند نیاز به استخراج مواد خام را کاهش دهد و درعین حال، مصرف انرژی را تا ۹۵ درصد کمتر کند. در این پژوهش، فرآیند بازیافت آلومینیوم با استفاده از روش شار نمکی شده است. تأثیر پارامترهایی نظیر دما، درصد اجزای نمک در شار، شرایط اختلاط و شکل ضایعات بر راندمان بازیافت و خلوص آلومینیوم مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، با ترکیب ۷۰ درصد سدیم کلرید و ۲۷ درصد پتاسیم کلرید در حضور گاز آرگون و اختلاط مناسب، میزان خلوص آلومینیوم بازیافتی به ۹۸٫۰۵ درصد می‌رسد. کاهش دما به ۸۰۰ درجه، مصرف انرژی را به میزان قابل توجهی کاهش داده و درعین حال، تأثیر محسوس بر درصد خلوص محصول نهایی ندارد. همچنین، ضایعات با فرم متراکم نسبت به ضایعات ورقه‌ای، نرخ بازیافت بیشتری داشته‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از شار نمکی، علاوه بر بهبود فرآیند بازیافت و کاهش سرباره، می‌تواند راهکاری اقتصادی و زیست‌محیطی برای بازیافت آلومینیوم در مقیاس صنعتی باشد.

کلیدواژه: آلومینیوم – بازیافت آلومینیوم – گداز آور نمکی – محیط زیست

## ۱. مقدمه

آلومینیوم یک فلز سفید نقره‌ای است که از بوکسیت به دست می‌آید. قبل از تبدیل به محصول تجاری کامل، آلومینیوم باید فرآیندهای مختلفی را طی کند؛ به همین دلیل تولید آلومینیوم پرهزینه و با مصرف انرژی بالاست. برای تولید هر تن آلومینیوم، چهار تن بوکسیت لازم است. آلومینیوم دارای ارزش ضایعات فلزی بالایی است و با ذوب شدن می‌توان آن را بازیافت کرده و برای ساخت محصولات مشابه دوباره به کار برد (AlSaffar & Bdeir, 2008).

تولید آلومینیوم معمولاً از طریق فرآیند هال-هرولت انجام می‌شود. باید توجه داشت که مصرف انرژی در این فرآیند بسیار بالاست که هزینه‌های مربوطه را افزایش داده و با ایده‌های پیرامون حفظ محیط زیست سازگار نیست. تولید اولیه آلومینیوم با فرآیند هال-هرولت شامل چهار مرحله است: استخراج و فرآوری سنگ معدن بوکسیت، تبدیل بوکسیت به اکسید آلومینیوم، سنتز کریولیت<sup>۱</sup> به منظور استفاده از فرآیند کاهش الکترولیتی و کاهش الکترولیتی آلومینیوم اکسید به آلومینیوم. آلومینیوم در صنایع مختلفی کاربردهای گوناگونی دارد. استخراج آلومینیوم بسیار پرهزینه‌تر از بازیافت آن است و از نظر زیست‌محیطی نیز بازیافت آلومینیوم به طور کلی سه نکته مثبت دارد؛ استخراج آلومینیوم برای محیط زیست مناسب نیست و بازیافت آن باعث می‌شود میزان استخراج از معادن کم‌تر شود (میزان گاز گلخانه‌ای تولیدشده در فرایند استخراج آلومینیوم حدود ۲۰ برابر میزان گاز تولیدی در بازیافت آن است.)، همچنین از آنجایی که استخراج آلومینیوم از منابع زمین کم می‌شود، استفاده کم‌تر از معادن و مخازن روی زمین، منابع را برای آیندگان نگه خواهد داشت و بازیافت ضایعات آلومینیومی، به پاک‌سازی طبیعت بسیار کمک می‌کند. به طور کلی، فرایند بازیافت آلومینیوم شامل جمع‌آوری، مرتب‌سازی، بازفرآوری، خرد کردن و تبدیل به محصول نهایی است. ماده اولیه قوطی نوشیدنی آلومینیوم است، اما حاوی مقادیر کمی از فلزات دیگر نیز می‌باشد که این مواد اضافی معمولاً منیزیم، منگنز، آهن، سیلیکون و مس هستند. (Amiri, Yaghmaei, & Mousavi, 2010; Darabi & yaghmaei, 2012)

نرخ بازیافت قوطی‌های آلومینیومی به دلیل ارزش بالای ضایعات فلزی، بالاتر از هر ماده بسته‌بندی دیگری استفاده شده است. در حال حاضر، بیشترین قسمت از قوطی‌های آلومینیومی بازیافت شده به تولید قوطی‌های جدید بازگشت داده می‌شود. بازیافت آلومینیوم همچنین می‌تواند به کاهش میزان زباله‌های جامد و پاکسازی محیط زیست کمک کند. برای افزایش نرخ بازیافت آلومینیوم، می‌توان از روش‌هایی مانند جداسازی فلزات و بهبود کیفیت بازیافت استفاده کرد. همچنین، ارتقای آگاهی مردم درباره بازیافت ضایعات فلزی و ایجاد انگیزه‌هایی برای

---

<sup>1</sup> Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>

بازیافت می‌تواند به افزایش نرخ بازیافت آلومینیوم کمک کند (Melwyn, Chandragandhi, Sathiyaseelan, & Srinath, 2023).

قبل از انجام عملیات ذوب بر روی آلومینیوم، از روش‌هایی مانند روش‌های فیزیکی استفاده می‌شود که عمدتاً برای بازیافت ضایعاتی که به‌اندازه کافی خردشده‌اند، مناسب هستند. استفاده از این روش‌ها به دلیل حذف هرچه بیشتر اجزا ناخالص از جریان ضایعات آلومینیومی، باعث کاهش چشمگیر انرژی مورد نیاز برای فرایندهای شیمیایی در مراحل بعدی می‌شود.

در روش گدازآور نمکی، از مواد شیمیایی گوناگون نظیر نمک‌های غیرآلی و برخی ترکیبات معدنی جهت افزودن به جریان قراضه‌ها استفاده می‌شود. همچنین، استفاده از گازهای بی‌اثر جهت جلوگیری از اکسیداسیون در این روش معمول است. گدازآور نمکی می‌تواند برای از بین بردن ناخالصی‌هایی نظیر کلسیم، سدیم و منیزیم مفید باشد؛ زیرا این دسته از ناخالصی‌ها در اثر ترکیب شدن با نمک‌هایی مانند کلرایدها یا فلوراید‌ها، ترکیبات یونی پایداری تشکیل می‌دهند (Wan et al., 2020).

جدول ۱. بررسی روش‌های فیزیکی و شیمیایی برای بازیافت آلومینیوم

Table 1. Investigation of Physical and Chemical Methods for Aluminum Recycling

Reference	Technology	Capacity	Uses
(Adam Gesing & Wolanski, 2001)	chopping	Reduce the size of each scrap stream	About 200 broad industries use facilities in North America
(Ruan et al., 2017)	Manual sorting	Capabilities vary, separating nonferrous components from each other at best	The use of industry is concentrated in low labor cost areas
(DeGaspari, 1999)	Magnetic sorting	It separates nonferrous components from steel	Widely used in industry
(Gaustad, Olivetti, & Kirchain, 2012)	Air separation	Separates lighter materials (foam, plastic, rubber, etc.) from the non-ferrous scrap stream.	Widely used in industry
(Adam Gesing & Wolanski, 2001)	flotation	It separates non-ferrous elements from each other (Al, Mg, Cu, etc.)	About 10 industries use facilities in North America
(Nakajima et al., 2010)	eddy current	It separates metal waste from non-metal	Widely used in industry
(Kruesi, 2011; Werheit, Fricke-Begemann, Gesing, & Noll, 2011)	Spectroscopy techniques	Sort mixed streams by metal and alloy family, ability to sort by alloy in trial stage	Use in small scale industry, pilot plant scale

)Drini, Katgerman, & Boom, 2004(	Chemical separation and melting technologies	Hops/electrolytic process	Removes Si, Fe, Mg, Mn, Cu, Zn, Cr	Industrial use, small market
)Kahveci & Unal, 2000; Padamata, Yasinskiy, & Polyakov, 2021(		Partial crystallization	Removes Si, Fe, Mg, Mn	Pilot plant scale, research and development
)Rousseau & Melin, 1989(		One-way freeze distillation	Removes Si, Fe, Cu, Mg, Mn, Zn	Laboratory scale, research and development
)Wilson, Veasey, & Squires, 1994(		Distillation	Zn removes Li from the aluminum melt	Pilot plant scale, research and development
)Gaustad, Olivetti, & Kirchain, 2011; A Gesing, AuBuchon, Torek, Dalton, & Wolanski, 2003(		hot crush	Separates cast and wrought aluminum	Little use in industry
)Kercher & Webb, 1982; Schloemann, 1982(		Filters	Removes SiC and alumina components	Widely used in industry
)Wyss & Schultz, 1999(		flotation	Removes hydrogen	Widely used in industry
)Adam Gesing, Stewart, Wolanski, Dalton, & Berry, 2000(		Fluxes	prevent oxidation; It removes gases, calcium, strontium, sodium, magnesium, lithium from aluminum	Widely used in industry

جدول (۱) نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف برای بازیافت آلومینیوم دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود است. به‌عنوان مثال، روش‌های فیزیکی مانند خردکردن و جداسازی مغناطیسی به‌دلیل سهولت در اجرا و هزینه‌های پایین‌تر، کاربرد گسترده‌ای در صنعت دارند. از سوی دیگر، تکنیک‌های پیشرفته‌تر مانند بازیافت مبتنی بر ابرگرانش<sup>۱</sup>، جداسازی الکترولیتی و کریستالیزاسیون جزئی توانایی بالاتری در حذف ناخالصی‌ها و افزایش خلوص آلومینیوم دارند، اما به دلیل هزینه‌های بالاتر و نیاز به تجهیزات خاص، عمدتاً

<sup>1</sup> High-Gravity Recycling

در مقیاس آزمایشگاهی استفاده می‌شوند. این نتایج تأکید می‌کنند که انتخاب روش بازیافت باید بر اساس نیازهای صنعتی، ملاحظات اقتصادی و تأثیرات زیست‌محیطی انجام شود و ترکیبی از این روش‌ها می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیند بازیافت کمک کند. در این تحقیق پس از بررسی انواع روش‌های بازیافت آلومینیوم این نتیجه بدست آمد که روش گدازآور نمکی به دلیل داشتن هزینه نسبتاً کمتر، مواد اولیه ساده‌تر و توانایی جداسازی آلومینیوم با خلوص بالا، به‌عنوان روش اولیه در بازیافت آلومینیوم مورد استفاده قرار گیرد. باین‌حال، باید توجه داشت که هر روشی که برای بازیافت آلومینیوم انتخاب می‌شود، باید براساس شرایط موجود، نیازهای صنعتی و محیط زیستی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. در همین راستا در این تحقیق، روش گدازآور نمکی براساس پارامترهای مختلف دما، درصد گدازآور نمکی، اختلاط و شکل اولیه قراضه‌ها بررسی شد و بهترین شرایط برای رسیدن به بیشترین درصد خلوص آلومینیوم معرفی گردید.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱ مواد

برای این پژوهش، از سدیم کلرید و پتاسیم کلرید با خلوص ۹۹ درصد (ساخت شرکت سیگما-آلدریج<sup>۱</sup>)، سدیم هیدروکسید (ساخت شرکت مرک<sup>۲</sup>) با خلوص بالای ۹۹ درصد و اسید سولفوریک با خلوص ۹۸ درصد استفاده شد. همچنین، قوطی‌های نوشیدنی از مراکز بازیافت تهیه گردید. ترکیب شیمیایی قراضه اولیه توسط آنالیز فلورسانس اشعه ایکس (XRF) تعیین شد. نتایج این آنالیز نشان داد که حدود ۹۵ درصد وزنی قراضه از آلومینیوم تشکیل شده است.

جدول ۲. نتایج فلورسانس اشعه ایکس قراضه اولیه

Table 2. X-ray fluorescence results of the primary scrap

composing elements	Al	Mg	Mn	Si	Fe	Cu
weight percent (%)	94.94	2.19	0.90	0.83	0.66	0.48

طبق نتایج بدست آمده از فلورسانس اشعه ایکس در جدول (۲) حدود ۹۵ درصد قوطی‌های نوشابه استفاده‌شده از آلومینیوم تشکیل شده است.

### ۲-۲ تجهیزات

<sup>1</sup> Sigma Aldrich

<sup>2</sup> Merck

برای ذوب قوطی‌های نوشابه از کوره الکتریکی تشعشی آزمایشگاهی سری AME 1200L (درب از بالا) آترا و برای شکل‌دهی قوطی‌ها از دستگاه پرس هیدرولیکی گروه صنعتی توان تکنیک استفاده شد و برای آزمودن مقدار خلوص آلومینیوم محصولات بدست آمده دستگاه فلورسانس اشعه ایکس (XRF) ساخت شرکت فیلیپس مدل PW1480 بکار گرفته شد. بوته از جنس اکسید آلومینیوم با تحمل دمایی ۱۵۰۰ درجه سلسیوس برای فرآیند تکلیس در کوره استفاده شد.



شکل ۱. عکس دستگاه‌ها: الف) کوره استفاده شده ب) دستگاه پرس استفاده شده ج) بوته اکسید آلومینیوم و آلومینیوم قرصی شکل

figure 1. Photo of the devices: a) used furnace b) used press machine c) alumina crucible and tablet-shaped aluminum

## ۲-۳ روش انجام آزمایش

برای دستیابی به آلومینیوم با خلوص قابل قبول و بازیابی بهتر آن، یک سیستم کاملاً محافظت‌شده با گاز آرگون و انجام اختلاط مناسب در یک کوره القایی با تزریق هم‌زمان گاز آرگون در فشار مناسب پیشنهاد داده شد. قوطی‌های نوشابه از مراکز بازیافت تهیه شدند و سپس برای رنگ‌بری، ابتدا سعی شد که این قوطی‌ها را در اسیدسولفوریک

<sup>1</sup> Philips

رقیق قرار داده تا رنگ آن‌ها برود؛ برای دستیابی به رنگ‌بری بهتر، غلظت‌های مختلف اسید تا ۰/۲ مولار امتحان شد. درنهایت، قوطی‌ها بعد از رنگ‌بری با قیچی فلز بر تا ابعاد ۳ سانتی‌متر خرد شدند. ورق‌های خردشده آلومینیومی تحت فشار ۳۰۰ بار در دستگاه پرس به شکل قرص درآمد. مقداری از آلومینیوم‌های آماده‌شده به صورت ورقه‌ای یا قرصی درون بوته از جنس اکسید آلومینیوم ریخته شدند. سپس در برخی از آزمایش‌ها، گداز نمک‌های NaCl، KCl، CaF<sub>2</sub> و NaOH که ۵ درصد وزنی خوراک اولیه بودند، با درصدهای مختلف به بوته اضافه و به کوره منتقل شدند.

کوره مورد استفاده در این آزمایش کوره المنتی بود. دمای نهایی کوره در آزمایش‌های مختلف بین ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. سپس مجرای گاز آرگون از بالای کوره به آن وصل شد و جهت جلوگیری از ورود هوا از طریق حفره موجود در بالای کوره المنتی، فشار نسبی گاز آرگون در ۵ بار تنظیم شد. بعد از گذشت ۷ تا ۸ دقیقه، کوره به دمای نهایی مدنظر رسید. باین حال به دلیل احتمال خطای دستگاه، ۱۰ دقیقه بیشتر صبر شد. سپس تا ۱ ساعت بسته به آزمایش موردنظر، با اختلاط هر ۱۰ دقیقه یک‌بار به وسیله میله استیل و یا بدون اختلاط، پیش رفت و درنهایت با جداسازی سرباره، محصول نهایی به دست آمد. شرایط عملیاتی هر کدام از آزمایش‌ها در جدول (۳) مشاهده می‌شود:

جدول ۳. شرایط عملیاتی آزمایش‌ها

Table 3. Operating Conditions of Experiments

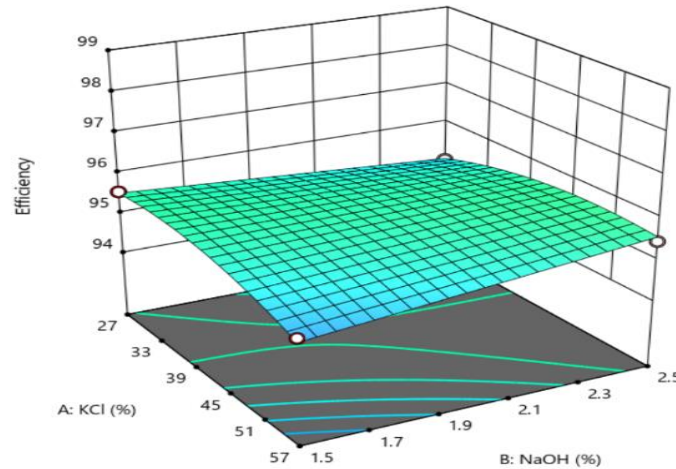
Test number	Temperature (°C)	mixing	Used scrap condition	NaCl (%)	KCl (%)	CaF <sub>2</sub> (%)	NaOH (%)
1	900	×	tablet shaped	-	-	-	-
2	900	×	tablet shaped	70	27	1.5	1.5
3	900	✓	tablet shaped	70	27	1.5	1.5
4	900	✓	tablet shaped	26	64	7.2	2.8
5	900	✓	sheet	63	27	3	7
6	900	✓	tablet shaped	27	63	3	7
7	800	✓	tablet shaped	63	27	3	7

برای کاهش دما پایین‌تر از ۸۰۰ درجه سلسیوس محدودیت وجود داشت چراکه دمای ذوب کلرایدهای موجود در گدازآور نمکی بین ۷۰۰ الی ۸۰۰ درجه سلسیوس است؛ هرچند کاهش ۱۰۰ درجه‌ای دما ممکن است بر اقتصاد فرآیند بازیافت آلومینیوم اثرگذار باشد.

## ۳. بحث و نتایج

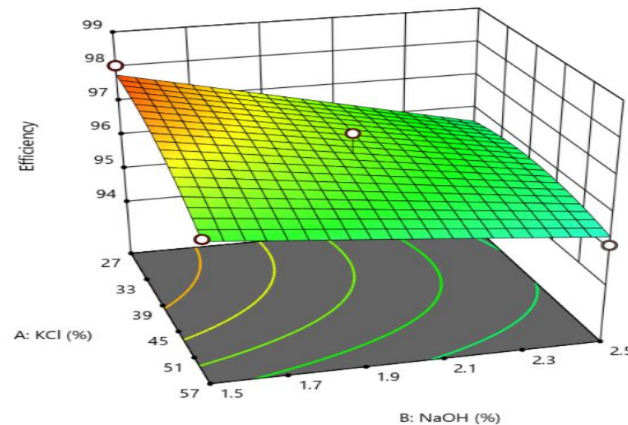
### ۳-۱ نتایج نرم افزار Design Expert

با رسم نمودارهای سه بعدی توسط این نرم افزار می توان تحلیلی برای چگونگی تأثیر ۳ پارامتر دما، اختلاط و شکل نمونه ها بر بازدهی آلومینیوم انجام داد. که نتایج آن در شکل های (۲) و (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار ۳ بعدی تأثیر درصد KCl و NaOH بر بازدهی آلومینیوم در حالت بدون اختلاط

Figure 2. 3D Diagram of the Effect of KCl and NaOH Percentage on Aluminum Efficiency Without Mixing



شکل ۳. نمودار ۳ بعدی تأثیر درصد KCl و NaOH بر بازدهی آلومینیوم در حالت همراه با اختلاط

Figure 3. 3D diagram of the effect of KCl and NaOH percentage on the efficiency aluminum in the state with mixing

همان طور که در شکل های (۲) و (۳) مشخص است، تأثیر پارامتر کیفیت اختلاط یا عدم اختلاط، بیشتر از پارامترهای عددی است .

## ۲-۳ نتایج آزمون های فلورسانس اشعه ایکس<sup>۱</sup> و آنالیز طیف سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی<sup>۲</sup> محصولات تولیدشده

فن طیف‌نگاری، به‌طور گسترده در صنعت مرتب‌سازی ضایعات آلومینیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. رایج‌ترین فن‌ها شامل آنالیز طیف سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی و فلورسانس اشعه گاما هستند. با استفاده از این فن‌ها، می‌توان ترکیب عناصر فلزی موجود در ضایعات را شناسایی کرد که این موضوع می‌تواند جداسازی مخلوط ضایعات را امکان‌پذیر کند. نتایج آنالیزهای XRF و ICP در جدول (۴) آمده است.

جدول ۴. نتایج فلورسانس اشعه ایکس محصولات

Table 4. X-ray fluorescence results of the products

Percentage of elements	Experiment 3	Experiment 4	Experiment 5	Experiment 6	Experiment 7
Al	98.05	98.68	97.95	97.66	97.94
Si	0.23	0.2	0.24	0.30	0.28
Fe	0.41	0.24	0.45	0.41	0.43
Cu	0.17	0.18	0.18	0.19	0.16
Mn	0.84	0.52	0.88	0.90	0.83
Mg	0.08	0.03	0.14	0.34	0.13
Zn	0.05	0.02	0.02	0.03	0.01
Cr	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
Ti	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
Pb	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
V	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Na	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
total Ni, Be ,Ca ,Li,Sn,Sr,Bi,Zr,B,Ga	0.11	0.05	0.07	0.1	0.02

برای انجام آزمون XRF محصولات، شسته شده و به‌صورت شکل (۴) آماده آزمون شده‌اند. در شکل (۴) سرباره‌های به‌دست آمده نیز نمایش داده شده است.

<sup>1</sup> X-ray fluorescence (XRF)

<sup>2</sup> Inductively coupled plasma mass spectrometry



شکل ۴. تصویر تمامی محصولات (محصولات در سمت چپ و سرباره‌ها بارنگ تیره‌تر در سمت راست قرار دارند)

Figure 4. Image of All Products (Products on the Left and Slags in Darker Color on the Right)

### ۳-۳ تأثیر اختلاط بر درصد خلوص آلومینیوم محصولات تولیدشده

در شرایطی که اختلاط صورت نمی‌گرفت- همانند آزمایش اول و دوم- توده خمیری شکل در بوته تشکیل می‌شد. این مسئله باعث می‌شد که حتی در صورت استفاده از گدازآور نمکی، خلوص آلومینیوم بهبود نیابد چراکه نمک‌های کلریدی با ناخالصی‌هایی نظیر منیزیم و منگنز برهم‌کنش مناسبی نداشتند و از طرفی شرایط برای کلسیم فلوراید جهت ایجاد فیلم اکسیدی مهیا نبود. در جدول (۵) تأثیر اختلاط بر نتایج نشان داده شده است:

نتایج حاصل از بررسی تأثیر اختلاط نشان داد که در آزمایش اول که بدون استفاده از گدازآور و اختلاط انجام شد، خلوص آلومینیوم تنها به ۹۲,۲۴ درصد رسید. در آزمایش دوم، استفاده از گدازآور نمکی بدون اختلاط خلوص را تا ۹۵,۱۵ درصد افزایش داد، اما همچنان نتیجه قابل قبولی حاصل نشد. در نهایت، آزمایش سوم که ترکیب استفاده از گدازآور نمکی و اختلاط را به کار گرفت، موفق به دستیابی به خلوص ۹۸,۰۵ درصد شد. این نتایج نشان می‌دهند که اختلاط مناسب، نقش کلیدی در بهبود عملکرد فرآیند بازیافت دارد، زیرا باعث افزایش برهم‌کنش بین کلرایدها و ناخالصی‌ها و در نتیجه تشکیل سرباره مؤثرتر می‌شود.

آزمایش اول در این مطالعه به منظور برآورد درصد خلوص ضایعات آلومینیوم انجام شد. هدف از آزمایش‌های بعدی، بهبود درصد خلوص بود که با استفاده از گدازآور نمکی در صورت عدم اختلاط، بهبود قابل توجهی در درصد خلوص به دست نمی‌آید. با این حال، اختلاط سبب می‌شود که کلرایدها با ناخالصی‌هایی نظیر منیزیم و منگنز ترکیب شود و آن‌ها را به صورت سرباره شکل می‌دهند. از طرفی، تشکیل فیلم اکسیدی حاصل از کلسیم فلوراید باعث می‌شود تا آلومینیوم به صورت کاملاً زیر سرباره قرار گیرد.

## ۳-۴ تأثیر ترکیب درصد نمک‌های متفاوت در گدازآور نمکی بر درصد خلوص آلومینیوم محصولات تولیدشده

در آزمایش‌های سوم و چهارم و ششم ترکیب نمکی موجود در گدازآور تغییر داد شده است. در این آزمایش‌ها درصد نمک‌های سدیم کلراید، سود، پتاسیم کلراید و کلسیم فلوراید به‌منظور بهبود تشکیل فیلم اکسیدی با درصدهای گفته‌شده با یکدیگر مقایسه شدند.

بررسی تأثیر ترکیب نمک‌های مختلف در گدازآور نمکی نشان داد که آزمایش سوم با ترکیب ۷۰ درصد سدیم کلراید و ۲۷ درصد پتاسیم کلراید بهترین خلوص آلومینیوم، یعنی ۹۸,۰۵ درصد، را به همراه داشت. در مقایسه، آزمایش چهارم و ششم که ترکیبات متفاوتی از کلسیم فلوراید و پتاسیم کلراید داشتند، خلوص‌های ۹۷,۶۸ درصد و ۹۷,۶۶ درصد را نشان دادند. این نتایج بیانگر آن است که افزایش درصد سدیم کلراید و کاهش کلسیم فلوراید تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود خلوص ندارد. بنابراین، با توجه به هزینه بالای کلسیم فلوراید، استفاده از درصد کمتر آن با حفظ عملکرد مناسب، از نظر اقتصادی منطقی‌تر به نظر می‌رسد.

آزمایش سوم بهترین درصد خلوص را در میان سه آزمایش دارد؛ طبق نتایج، استفاده بیشتر از کلسیم فلوراید تأثیر ناچیزی در بهبود درصد خلوص دارد و بهتر است جهت ملاحظات اقتصادی (گران بودن کلسیم فلوراید) درصد آن در حدود سه درصد انتخاب شود. اصولاً، تغییر در ترکیب گدازآور نمکی، بیشترین درصد سدیم کلراید و پتاسیم فلوراید، باید تغییر عمده‌ای در درصد خلوص آلومینیوم ایجاد نکند؛ چراکه این کلرایدها با ناخالصی‌ها ترکیب می‌شوند و نوع کاتیون چندان اهمیتی ندارد؛ همچنین، سدیم کلراید و کلسیم فلوراید هم با ناخالصی‌ها واکنش نمی‌دهند. بنابراین، می‌توان فاکتور اقتصادی را به‌عنوان اصلی‌ترین عامل در انتخاب ترکیب نمکی، معرفی کرد.

## ۳-۵ تأثیر دما بر درصد خلوص آلومینیوم محصولات تولیدشده

دما از دو جهت حائز اهمیت است. در جهت اول، ملاحظات مصرف انرژی بایستی در نظر گرفته شود. با کاهش دما در حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، میزان مصرف انرژی تا حدود ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. در جهت دوم، کاهش میزان سرباره تولیدی مشاهده شده است. این موضوع دلیل خود را دارد؛ زیرا پس از ذوب، نمونه در محیط عادی (با حضور اکسیژن) سرد می‌شود. درحالی‌که دمای نمونه در حدود ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد است، آن زودتر از زمانی که دمای آن ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد است، سرد می‌شود و به زیر دمای ذوب آلومینیوم می‌رسد. به همین دلیل، فرصت کمتری برای اکسیداسیون وجود دارد و سرباره کمتری تولید می‌شود.

از طرفی، محدودیتی برای کاهش دما وجود دارد که پایین تر از ۸۰۰ درجه سانتی گراد است. زیرا دمای ذوب سدیم کلراید و پتاسیم کلراید بین ۷۵۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد است. طبیعتاً، پایین تر از دمای مذکور، نمکها مذاب نمی شوند و کمینه دمای عملیاتی باید ۸۰۰ درجه سانتی گراد باشد.

نتایج بررسی تأثیر دما بر خلوص آلومینیوم نشان داد که در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد (آزمایش سوم)، خلوص آلومینیوم به ۹۸,۰۵ درصد رسید. درحالی که با کاهش دما به ۸۰۰ درجه سانتی گراد (آزمایش هفتم)، خلوص آلومینیوم به ۹۷,۹۴ درصد کاهش یافت. این اختلاف جزئی نشان می دهد که کاهش دما تأثیر چشمگیری بر خلوص ندارد، اما از نظر اقتصادی می تواند با کاهش مصرف انرژی و تولید سرباره به بهینه سازی فرآیند کمک کند. باین حال، محدودیت های ذوب نمک های کلریدی در دمای پایین تر از ۸۰۰ درجه سانتی گراد باید مدنظر قرار گیرد. طبق نتایج ثبت شده در بخش قبل، آزمایش سوم بهترین درصد خلوص را در میان آزمایش های دیگر دارد. به همین جهت در شرایط مشابه فقط در دمای پایین تر آزمایش هفتم انجام شد.

### ۳-۶ تأثیر شکل ضایعات بر درصد خلوص آلومینیوم محصولات تولید شده

در مقیاس صنعتی، قوطی های نوشابه پر شده در جریان مذابی از آلومینیوم ریخته می شوند تا اکسیداسیون آنها کاهش یابد. در شرایط بی اثر، شکل قراضه ها تأثیری بر اکسیداسیون ندارد. باین حال، در این تحقیق به دلیل فشار بالای گاز آرگون، ضایعات قبل از ذوب شدن به کف کوره منتقل می شدند و این موضوع موجب کاهش مقدار آلومینیوم بازیافتی می گردید. جدول (۸) درصد آلومینیوم بازیافتی و خلوص آلومینیوم را در آزمایش های ۳ و ۵ نشان می دهد که در آنها همه شرایط به جز شکل ضایعات یکسان بوده است.

جدول ۵. بررسی تأثیر شکل ضایعات بر خلوص آلومینیوم به دست آمده

Table 5. Examining the effect of the shape of the scrapes on Aluminum purity

Comparison of differences in the shape and initial state of lesions		
	The third experiment	The fifth experiment
Purity	98.05%	97.95%
Recycled amount (based on initial weight)	79%	62%

درصد خلوص در دو آزمایش بسیار نزدیک به هم است ولی مقدار بازیافتی آلومینیوم در آزمایش سوم به طرز چشمگیری بیشتر است؛ برای جلوگیری از مشکل بیرون ریختن مواد از بوته، می توان حجم بوته را بزرگ تر در نظر گرفت.

### ۷-۳ مقدار سرباره تولیدی در آزمایش های مختلف

با توجه به اینکه ۵ درصد از وزن ضایعات به صورت نمکی و ۴ درصد به عنوان ناخالصی از ترکیب خارج می شود، حدود ۱۰ درصد از وزن اولیه ضایعات به شکل سرباره وجود دارد. با این حال، نتایج ثبت شده نشان می دهد که این مقدار بیشتر است. همچنین، نمونه ها در بیرون از کوره و در شرایط اتمسفریک سرد می شوند.

جدول ۶. مقدار سرباره تولیدی در آزمایش های مختلف

Table 6. The amount of slag produced in different tests

The amount of slag produced in different tests (in terms of weight percentage of the original sample)	
21	Experiment 3
27.1	Experiment 4
38.2	Experiment 5
27.6	Experiment 6
23.7	Experiment 7

در صورتی که عمل سرد کردن نمونه در کوره و در حضور گاز آرگون انجام شود، مقدار سرباره به میزان حدود ۱۰ درصد از جرم اولیه ضایعات خواهد بود. با این حال، برای انجام این کار باید مسائل اقتصادی را نیز در نظر گرفت. به عنوان مثال، گاز آرگون مصرف شده برای این منظور، باعث اکسید شدن حدود ۱۰ درصد وزنی از نمونه اولیه می شود. همچنین، مدت زمان لازم برای سرد کردن نمونه در داخل کوره بسیار طولانی است و دمای نمونه به دمای محیط نزدیک می شود. همان طور که بیان شد، کاهش دما نیز از جمله پارامترهای مهمی است که تأثیر مستقیم بر میزان تولید سرباره دارد.

### ۴. نتیجه گیری

بازیافت آلومینیوم با استفاده از روش شار نمکی، راهکاری مؤثر برای کاهش هزینه های تولید، افزایش بهره وری و کاهش اثرات زیست محیطی است. نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب ۷۰٪ سدیم کلرید و ۲۷٪ پتاسیم کلرید

در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس، همراه با فرآیند اختلاط، به خلوص ۹۸,۰۵٪ در محصول نهایی منجر می‌شود. همچنین، کاهش دما به ۸۰۰ درجه سلسیوس، تأثیر ناچیزی بر خلوص داشت، اما میزان مصرف انرژی و تولید سرباره را کاهش داد.

علاوه بر این، انجام اختلاط نقش مهمی در افزایش خلوص آلومینیوم داشت، زیرا باعث بهبود واکنش بین نمک‌های شار و ناخالصی‌های موجود شد. همچنین، مشخص شد که ضایعات فشرده شده (قرصی شکل) در مقایسه با ضایعات ورقه‌ای، بازدهی بیشتری دارند و میزان بازیافت آلومینیوم در این حالت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. میزان سرباره تولیدی نیز با کنترل شرایط سرد شدن و استفاده از محیط بی‌اثر مانند گاز آرگون کاهش یافت.

به‌طور کلی، این روش می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار و اقتصادی در صنعت بازیافت آلومینیوم مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، برای بهینه‌سازی بیشتر، می‌توان تأثیر سایر ترکیبات شیمیایی در شار نمکی، روش‌های کاهش تولید سرباره و مصرف انرژی را بررسی کرد. این بهبودها می‌توانند به توسعه فناوری‌های نوین در صنعت بازیافت آلومینیوم و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک کنند.

## ۵. مراجع

- AlSaffar, K. A., & Bdeir, L. M. H. (2008). Recycling of aluminum beverage cans. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 12(3), 157-163.
- Amiri, F., Yaghmaei, S., & Mousavi, S. M. (2010). Use of biological leaching method in detoxification and recovery of valuable metals from used catalysts. *Chemical Engineering of Iran*, 9(50), -. doi:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17355400.1389.9.50.4.0>
- Darabi, H., & yaghmaei, S. (2012). Waste electrical and electronic equipment is a valuable resource for recycling. *Chemical Engineering of Iran*, 11(62), -. doi:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17355400.1391.11.62.8.2>
- DeGaspari, J. (1999). Making the most of aluminum scrap. *Mechanical Engineering*, 121(11), 71-73.
- Drini, B., Katgerman, L., & Boom, R. (2004). *Metal refining with fractional crystallisation: State-of-the-art and future prospects*.
- Gaustad, G., Olivetti, E., & Kirchain, R. (2011). Toward sustainable material usage: evaluating the importance of market motivated agency in modeling material flows. *Environmental science & technology*, 45(9), 4110-4117.
- Gaustad, G., Olivetti, E., & Kirchain, R. (2012). Improving aluminum recycling: A survey of sorting and impurity removal technologies. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 79-87.
- Gesing, A., AuBuchon, B., Torek, P., Dalton, R., & Wolanski, R. (2003). Assuring continued recyclability of automotive aluminum alloys: chemical-composition-based sorting of wrought and cast Al shred.
- Gesing, A., Stewart, C., Wolanski, R., Dalton, R., & Berry, L. (2000). Scrap preparation for aluminum alloy sorting. *Recycling of Metals and Engineered Materials*, 1233-1249.
- Gesing, A., & Wolanski, R. (2001). Recycling light metals from end-of-life vehicle. *JOM*, 53(11), 21-23.

- Kahveci, A. I., & Unal, A. (2000). Refining of a 5XXX series aluminum alloy scrap by Alcoa fractional crystallization process. *Recycling of Metals and Engineered Materials*, 979-991.
- Kercher, S., & Webb, M. (1982). Scrap processing by eddy current separation techniques. *Resources and Conservation*, 8(1), 61-74.
- Kruesi, P. R. (2011). Methods of recovering and purifying secondary aluminum. In: Google Patents.
- Melwyn, J. G., Chandragandhi, B., Sathiyaseelan, G., & Srinath, P. (2023). Aluminium scrap recycling in a production furnace: Minimizing dross formation for sustainable and efficient recovery. *Materials Today: Proceedings*.
- Nakajima, K., Takeda, O., Miki, T., Matsubae, K., Nakamura, S., & Nagasaka, T. (2010). Thermodynamic analysis of contamination by alloying elements in aluminum recycling. *Environmental science & technology*, 44(14), 5594-5600.
- Padamata, S. K., Yasinskiy, A., & Polyakov, P. (2021). A review of secondary aluminum production and its byproducts. *JOM*, 73, 2603-2614.
- Rousseau, M., & Melin, A. (1989). The processing of non-magnetic fractions from shredded automobile scrap: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 2(2), 139-159.
- Ruan, J., Dong, L., Zheng, J., Zhang, T., Huang, M., & Xu, Z. (2017). Key factors of eddy current separation for recovering aluminum from crushed e-waste. *Waste Management*, 60, 84-90.
- Schloemann, E. (1982). Eddy-current techniques for segregating nonferrous metals from waste. *Conservation & recycling*, 5(2-3), 149-162.
- Wan, B., Li, W., Liu, F., Lu, T., Jin, S., Wang, K., . . . Chen, W. (2020). Determination of fluoride component in the multifunctional refining flux used for recycling aluminum scrap. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3447-3459.
- Werheit, P., Fricke-Begemann, C., Gesing, M., & Noll, R. (2011). Fast single piece identification with a 3D scanning LIBS for aluminium cast and wrought alloys recycling. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(11), 2166-2174.
- Wilson, R., Veasey, T., & Squires, D. (1994). The application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes. *Minerals Engineering*, 7(8), 975-984.
- Wyss, R., & Schultz, P. (1999). Color sorting aluminum alloy scrap for recycling. *LIGHT MET(WARRENDALE PA)*, 1093-1098.