

## آنالیز انرژی و ارزیابی راندمان برای یک کوره ذوب آلومینیوم

حجت طالبی<sup>۱\*</sup>، قنبرعلی شیخزاده<sup>۲</sup>، سید شهریار میرحکیمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی اراک، ایران

hotenecon@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه کاشان، ایران

sheikhz@kashanu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار مهندسی شیمی گرایش پتروشیمی، دانشگاه آزاد اسلامی اراک، ایران

smirhakimi@gmail.com

**چکیده:** راندمان یک کوره ذوب آلومینیوم احتراق مستقیم که سوخت آن گاز طبیعی است، در یک کارخانه ذوب و نورد با استفاده از روش‌های انرژی و انرژی، به منظور بهبود سیستم مشعل در کوره و شناخت پتانسیل‌های بهبود ارزیابی می‌شوند. چنین بهبودهایی نه فقط مصرف سوخت را، که میزان گازهای سمی دودکشی و اثرات زیست‌محیطی مثل تغییر آب‌وهوا را نیز کاهش می‌دهد. در این مطالعه، راندمان انرژی کوره ذوب آلومینیوم ۱۰٪ و راندمان انرژی آن ۶٪ به دست آمد. آنالیز انرژی در مقایسه با آنالیز انرژی برای آنالیز و بهبود راندمان کوره مفیدتر می‌باشد و راندمان انرژی یک اندازه‌گیری عملی‌تر در واقعیت است. بینش‌های به دست آمده از طریق ارزیابی کوره ذوب حاصل می‌گردد. پتانسیل‌های بهبود مشخص شده مورد بحث قرار می‌گیرد. با بررسی نتایج راهکارهایی شامل اضافه کردن مشعل بازیاب و سیستم بازیاب انرژی، پیش گرم نمودن شمش‌ها، متراکم کردن گاز طبیعی، بازیابی گرما از آب خنک‌کننده برای بهینه نمودن مصرف انرژی پیشنهاد شد، که پیش‌بینی می‌شود برای طراحان سیستم‌های جدید و تکمیلی مفید و مورد علاقه باشد.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی، راندمان، انرژی، آلومینیوم، کوره ذوب.

این همه رشد تقاضا برای سبک شدن وسایل نقلیه، ریخته‌گری آلومینیوم را افزایش داده است.

### ۳. آنالیز انرژی

انرژی به صورت ماکزیم کاری تعریف می‌شود که می‌تواند توسط یک سیستم یا جریان ماده یا انرژی تولید شود، زمانی که در تعادل با محیط مرجع درمی‌آیند [۳]. آنالیز انرژی یک روش برای ارزیابی سیستم‌ها یا فرایندهاست [۴ و ۵]. آنالیز انرژی متفاوت از آنالیز انرژی و عملی‌تر است. آنالیز انرژی بر مبنای قانون اول ترمودینامیک بنا شده است، درحالی‌که آنالیز انرژی بر مبنای قانون‌های اول و دوم ترمودینامیک است. قانون دوم درباره کیفیت انرژی سخن گفته و اثبات می‌کند انرژی در طول یک فرایند برگشت‌ناپذیر<sup>۲</sup> تخریب می‌شود [۶]. غیر از روش انرژی، روش‌های دیگری بر مبنای قانون دوم وجود دارد [۷ و ۱۰]. اما انرژی نوع معمول آن است. برخلاف انرژی، انرژی پایدار نیست و انرژی اولیه حداقل در قسمتی توسط برگشت‌ناپذیری‌های فرایند تخریب می‌شود.

فرایند ذوب سه نوع انرژی اتلافی دارد: گازهایی که از طریق دودکش هدر می‌روند، گرمای اتلافی که به جو رها می‌شود و جامدات اتلافی که از کوره تخلیه می‌شوند. هر یک از این‌ها روی محیط‌زیست نیز تأثیرگذار است.

### ۴. پیشینه تحقیق

گودزی و همکاران، آنالیز انرژی و انرژی سیکل تولید فولاد کارخانه فولاد یاسوج را انجام و نشان دادند بازده انرژی ۴۴/۸۵٪ و بازده انرژی ۲۱/۳۵٪ است؛ این اختلاف نشان‌دهنده امکان بیشتر سیکل برای بهینه‌سازی است [۱۱].

حسن الزمان و همکاران، آنالیز انرژی و انرژی یک کوره آنیل<sup>۳</sup> را بررسی کردند و راندمان انرژی ۱۶/۶۸٪ و راندمان انرژی ۷/۳٪ را به دست آوردند. با استفاده از سیستم بازیابی گرما حدود  $113 \frac{\text{MJ}}{\text{h}}$  بازیابی شد. حدود ۸/۱۱٪ سوخت ذخیره شده است [۱۲].

کارخانه ویستون آمریکا نیز با مطالعه روی یک کوره قدیمی خود به ظرفیت ۵۰۰۰ kg به مصرف انرژی  $5300 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  دست پیدا کرد که بعد از بهینه‌سازی، مصرف انرژی به  $2300 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  کاهش پیدا کرد [۱۳].

شرکت اتومبیل‌سازی تویوتا در کامیگوی ژاپن، با کمک گرفتن از تحلیل انرژی و انرژی و نصب مشعل بازیاب انرژی<sup>۴</sup>، به کاهش ۲۱٪

کاهش مصرف سوخت فسیلی و انتشار گازهای آلاینده ناشی از آن، جزء اهداف محیط‌زیستی است. گاز طبیعی یک سوخت فسیلی است که به طور معمول در کاربردهای صنعتی، تجاری و خانگی استفاده می‌شود. تلاش‌هایی برای کنترل انتشار گازهای آلاینده ناشی از احتراق سوخت گاز طبیعی انجام شده است؛ اگرچه گازهای حاصل از احتراق ناشی از هر واحد انرژی سوخت گاز، پایین‌تر از همان برای نفت و زغال‌سنگ است. ذوب و نورد در صنایع زیادی از جمله اتومبیل استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، فلز آلومینیوم در بخش ذوب و ریخته‌گری جایگزین آهن و استیل شده است؛ این امر به افزایش کاربرد آلومینیوم منتهی می‌شود.

در این مقاله [۱]، راندمان کوره گزسوز ذوب آلومینیوم در یک کارخانه ذوب و نورد با استفاده از روش‌های انرژی و انرژی<sup>۱</sup>، به منظور بالا بردن کارایی سیستم و شناخت پتانسیل‌های بهبود ارزیابی می‌شود. کارخانه آلومینیوم پارس به عنوان کارخانه نمونه در نظر گرفته شده است. در این مقاله، ذوب و ریخته‌گری و راندمان کوره ذوب آلومینیوم توضیح داده می‌شود. برآورد انرژی و انرژی کوره گزسوز ذوب آلومینیوم در یک کارخانه ذوب و نورد، درباره راه‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی که می‌تواند انتشار گازهای آلاینده محیط‌زیستی و اثرات آن‌ها مثل تغییر آب‌وهوایی را کاهش دهد، بحث می‌کند.

### ۲. ذوب و ریخته‌گری فلز

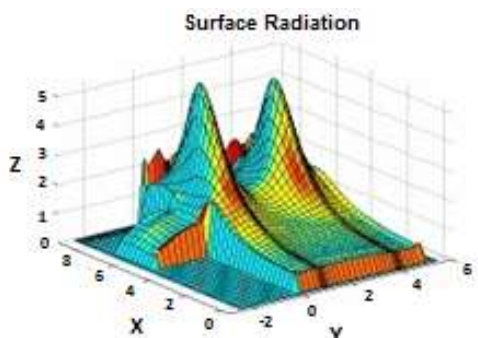
صنعت ذوب و نورد فلز از فلز مذاب استفاده می‌کند تا فلز ریخته‌گری شده را برای محصولات تولیدی فراهم کند. وسیع‌ترین کاربرد محصولات فلزی ذوب و ریخته‌گری در وسایل نقلیه، صنایع غذایی و دارویی و تجهیزات ساختمانی است.

دو نوع اصلی فلز وجود دارد که در ریخته‌گری فلز استفاده می‌شود: آهنی و غیرآهنی. حجم بالای تولید در بخش غیرآهنی با روش ریخته‌گری انجام می‌شود. ریخته‌گری آلومینیوم در بخش غیرآهنی، رشد پیوسته و مداومی را تجربه کرده است [۲]. ۷۸٪ کل محموله غیرآهنی را شامل می‌شود.

یک کیلوگرم ریخته‌گری آلیاژ آلومینیوم از نظر اقتصادی معادل ۵-۵ kg آهن ریخته‌گری شده است؛ زیرا آلومینیوم ۳ تا ۵ برابر گران‌تر از استیل است. ارزش مؤثر آلومینیوم در کاربردهای خودرویی و برخی کاربردهای دیگر تقریباً ۲۰۰-۱۳۳٪ ارزش استیل است [۱]. با

2. Irreversible Process  
3. Annealing Furnace  
4. Regenerative Burner

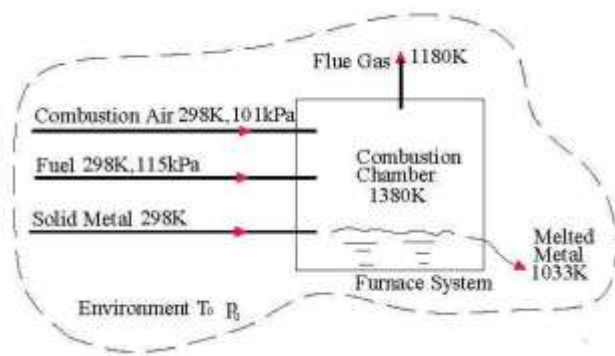
1. Exergy



شکل (۲): نمودار آنالیز حرارتی کوره (سه بعدی)

### ۶. آنالیز کوره

فرایندها در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. مستطیل سیستم کوره را نشان می‌دهد؛ از جمله محفظه احتراق. خط چین‌ها مرز سیستم ترکیبی از جمله سیستم کوره و محیط مرجع را بیان می‌کند؛ فرض شده محیط مرجع در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  و فشار  $1\text{atm}$  ( $10^5\text{ Pa}$ ) باشد.



شکل (۳): سیستم کوره و محیط مرجع

### ۱.۶. داده‌های فرایند ذوب

اطلاعات از مواد و مصرف انرژی از گزارش‌های تولید جمع‌آوری شده و اطلاعات فرایندها از سیستم کنترل عملکرد، اسناد فنی بایگانی کارخانه به دست آمده است. جدول (۱) اطلاعات فرایند کوره را ارائه می‌دهد؛ از جمله مصرف سوخت، گاز احتراقی ورودی، فلز مذاب تولیدی و گاز دودکش.

جدول (۱): داده‌های فرایند برای کوره ذوب

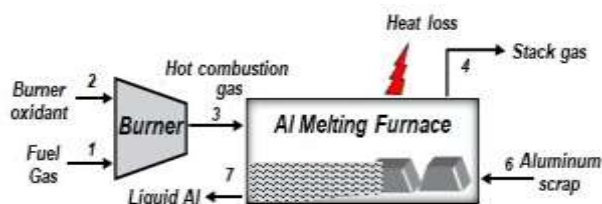
فشار (MPa)	دما (K)	مقدار		ماده
		جرم (kg)	حجم ( $\text{m}^3$ )	
۰/۱۱۵	۲۹۸	۳۸۳۱۹۸	۵۱۴۶۹۲	گاز طبیعی
۰/۱۰۱	۲۹۸	۲۱۶۳۴۳۵	۱۸۳۷۴۲۲	هوای احتراقی
۰/۱۰۱	۲۹۸	۱۹۷۲۰۰۰	--	فلز جامد
۰/۱۰۱	۱۱۸۰	۲۵۴۶۶۳۳	۸۸۰۹۶۵۶	گاز دودکشی
۰/۱۰۱	۱۰۳۳	۱۹۷۲۰۰۰	--	فلز ذوب شده

مصرف انرژی در مقایسه با کوره‌های قدیمی رسید [۱۴].

در این مقاله راندمان انرژی و آگزرژی یک کوره ذوب آلومینیوم برای نشان دادن میزان اتلاف انرژی محاسبه می‌شود تا بتواند توجیه مناسبی برای توسعه و بهبود سیستم از لحاظ مصرف انرژی باشد. ضمناً راهکارهای عملی مفید با مقایسه راندمان انرژی و آگزرژی، در نظر گرفته می‌شود.

### ۵. اطلاعات مقدماتی فرایند

کارخانه ذوب و نورد آلومینیوم پارس، در سال ۱۳۵۴ در شهر صنعتی کاوه در شهرستان ساوه واقع در استان مرکزی تأسیس شد. محصولات حاصل از نورد از جمله ورق و فویل برای مصارف حمل‌ونقل، غذایی، دارویی و ساختمانی به کار می‌رود. در مدت این مطالعه، کارخانه ۲۴ ساعت در یک روز، ۷ روز هفته، حدود ۵۰ هفته در سال فعالیت می‌کند. چهار کوره ذوب و نگهداری تحت عمل دستی<sup>۱</sup> خط تولید برای ریخته‌گری ورق وجود دارد. دو کوره ذوب و نگه‌دارنده از زمان احداث کارخانه وجود دارد و دو کوره ذوب و نگه‌دارنده دیگر در اواسط دهه ۸۰ هجری شمسی جایگزین شده است. از سه خط تولید یک خط در اواسط دهه ۸۰ نوسازی شده است.



شکل (۱): تصویر عملیات کوره

شکل (۱) تخلیه آلومینیوم مذاب را توسط کوره نشان می‌دهد. کوره شامل محفظه احتراق و آگزوز می‌شود. این مطالعه روی کوره ۱ تمرکز می‌کند؛ یک کوره گاز سوز شعله‌مستقیم که بیشترین ظرفیت را در میان ۴ کوره دارد. در طول فعالیت، شمش‌ها، ضایعات و فلز داغ از طریق درب کنار کوره شارژ می‌شوند. فلز مذاب در طرف مقابل تخلیه می‌شوند. دو مشعل در انتهای دیوار بدون شارژ و تخلیه نصب شده‌اند. گاز دودکش در طرف مقابل مشعل‌ها، از کوره خارج می‌شود.

شکل (۲) نمودار آنالیز حرارتی کوره ذوب را با نمای سه‌بعدی به صورت نحوه توزیع انتقال حرارت تابشی از حمام مذاب با توجه به موقعیت مکانی شبیه‌سازی شده در کوره مذاب به منظور آنالیز اتلاف حرارتی کوره و اثرگذاری مشعل‌ها و گازدودکشی<sup>۲</sup> تخلیه شده بر آن نشان می‌دهد.

1. Manual Operation
2. Flue Gas

در مرجع [۱] در ۱۳۸۲، دمای محصولات احتراقی<sup>۲</sup> کارخانه، ۱۳۶۰K ثبت شده است؛ در آزمایش قبلی دمای گاز دودکش ۱۱۸۰K ثبت شد.

#### ۴.۶. شارژ داغ

پس از اینکه فلز ذوب شده برای ریخته‌گری از کوره نگه‌دارنده خارج می‌شود، به منظور نگهداری دمای کوره، یک بار داغ از آلومینیوم مذاب در دمای ۱۰۸۸ K تا ۱۰۳۳ K به کوره تحویل داده می‌شود. بارهای داغ برای یک مدت کوتاه (چندین ساعت) در طول یک روز تولید معمولی نگهداری می‌شوند. سپس دسته‌های شمش به کوره وارد شده و ذوب می‌شوند و ترکیبی از بار داغ و فلز ذوب‌شده جدید در دمای ۱۰۳۳ K برای ریخته‌گری تحویل داده می‌شوند. بار داغ در سیستم کوره برای مدت کوتاهی می‌ماند و تقریباً هیچ انرژی‌ای مصرف نمی‌کند، بنابراین بار داغ در محاسبات نادیده گرفته می‌شود.

#### ۷. آنالیز ترمودینامیکی کوره

موازنه‌های انرژی و اگزوزی و راندمان‌ها برای سیستم کوره به دست آورده می‌شوند [۱۵]. دمای محیط مرجع  $T_0$  و فشار  $P_0$ ، به ترتیب  $^{\circ}C$  ۲۵ و ۱ atm در نظر گرفته می‌شوند.

#### ۱.۷. فرضیات

فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- سیستم ارزیابی شده (شکل ۱) در حالت پایدار عمل می‌کند و هیچ فعل و انفعالاتی ندارد.
- سوخت و محصولات احتراق به‌عنوان ترکیبات گازی ایدئال رفتار می‌کنند.
- محصولات احتراق از طریق دودکش از کوره خارج می‌شوند.
- مصرف الکتریسیته برای موتورها، مونیتورینگ<sup>۳</sup> و وسایل کنترل نادیده گرفته می‌شوند؛ زیرا در مقابل مصرف سوخت کوچک است.
- اگرچه سوخت فراهم‌شده توسط فروشنده گاز طبیعی شامل نیتروژن ( $N_2$ )، کربن دی‌اکسید ( $CO_2$ )، هیدروژن سولفید ( $H_2S$ ) و بخار آب ( $H_2O$ ) است، حجم  $N_2$ ،  $CO_2$ ،  $H_2S$  و  $H_2O$  نادیده گرفته شده است؛ زیرا آن‌ها اندک هستند.

#### ۲.۷. احتراق سوخت

به‌استثنای اجزای کوچک‌تر، ترکیب مولار گاز طبیعی ۹۰٪ متان ( $CH_4$ )، ۴٪ اتان ( $C_2H_6$ )، ۳٪ پروپان ( $C_3H_8$ )، ۰٫۹۸٪ بوتان ( $C_4H_{10}$ )، ۰٫۰۸٪ پنتان ( $C_5H_{12}$ ) است [۱۶]. احتراق در هوا از یک مول گاز طبیعی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

#### ۲.۶. مصرف سوخت و روزهای تولید

آنالیز انرژی و اگزوزی برای ۱۹۷۲۰۰۰ kg تولید انجام شده است. برنامه تولید در مدت این مطالعه ۳ شیفت در روز، ۶ روز در هفته بوده است. از اردیبهشت ۱۳۹۵ تا مرداد ۱۳۹۵، ۹۶ روز کاری وجود دارد که با توجه به ۴۴ روز خاموشی‌های تعطیلات و نگهداری ظرفیت تولید کامل نبوده و در طول ۵۲ روز کاری نادیده گرفته شده است. اطلاعات مصرف سوخت از گزارش روزانه با توجه به قرائت‌های اندازه‌گیر گاز طبیعی گرفته می‌شود. ماده قبلی و مصرف سوخت بر اساس آخرین آمار ثبت شده است (۱۳۸۲). این اطلاعات معتبر در نظر گرفته می‌شوند؛ زیرا عملکرد کوره بر اساس گزارشات ماده و سوخت در طول این مطالعه است. بر اساس گزارش اپراتور، ۱ kg شمش ورودی به‌طور میانگین  $0/261 m^3$  سوخت نیاز دارد. بنابراین  $514692 m^3$  گاز نیاز است تا ۱۹۷۲۰۰۰ kg فلز مذاب تولید شود. گاز طبیعی فشار ۱۱۵ kPa (۲ psi) دارد و ارزش حرارتی بالاتر تقریباً  $55/8 \frac{MJ}{kg}$  است.

#### ۳.۶. آنالیز مواد خام

محاسبات برای ساده‌سازی بر اساس شمش آلومینیوم خالص است؛ اگرچه ماده واقعی استفاده‌شده در ذوب و ریخته‌گری، آلیاژ ۸۰۱۱ است که ویژگی‌هایش متفاوت از آلومینیوم خالص است. فرایند ذوب آلیاژ ۸۰۱۱ پیچیده‌تر از آلومینیوم خالص است. به‌طور معمول گرمای ویژه آلیاژ آلومینیوم کمتر از آلومینیوم خالص است؛ یعنی جرم آلیاژ به گرمای کمتری نسبت به آلومینیوم برای رسیدن به یک دما نیاز دارد. اطلاعات کارخانه نشان می‌دهد که آلیاژ ۸۰۱۱ شامل ۹۷٪ تا ۹۸٪ آلومینیوم، ۰٫۵٪ تا ۰٫۹٪ سیلیس، ۰٫۰۶٪ تا ۰٫۱٪ آهن و حداکثر ۰٫۰۷٪ عناصر دیگر است. نمونه قرار دادن آلیاژ ۸۰۱۱ به‌جای آلومینیوم خالص منطقی به نظر می‌رسد؛ زیرا جزء اصلی آلومینیوم است. نکته این است که ضایعات از فرایندها بازیابی می‌شوند و کیفیت ضایعات همانند شمش در نظر گرفته شده است. ارجاعات به ماده یا شمش در این مطالعه شامل ضایعات هم می‌شوند.

#### ۴.۶. هوای احتراقی، گاز احتراقی و گاز دودکشی

هوای احتراقی<sup>۱</sup> توسط یک فن فراهم می‌شود که هوا را از درب ورودی کارخانه می‌کشد. برای تنظیم فشار هوای درب ورودی کارخانه، تنظیم فشار هوای کارخانه توسط واحد بازرسی هوا کنترل می‌شود. مقدار هوای احتراقی و مقدار گاز دودکشی از مقدار سوخت مصرفی محاسبه می‌شود؛ به عبارت دیگر، بر اساس معادلات شیمیایی

اگر انرژی ورودی و خروجی برای محفظه کوره بر اساس شکل (۵) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$A_{input} = A_{fuel} + A_{solid\ metal} + A_{comb\ air} \quad (۵)$$

$$A_{fuel} = A_{fuel}^{tm} + A_{fuel}^{ch}$$

$$A_{fuel}^{tm} = n_{(fuel)} \bar{a}_{fuel}^{tm}$$

$$\bar{a}_{fuel}^{tm} = (\bar{h} - \bar{h}_o) - T_o(\bar{s} - \bar{s}_o) + \bar{R}T_o \ln\left(\frac{p_{fuel}}{p_o}\right)$$

$$A_{fuel}^{ch} = n_{(fuel)} \bar{a}_{fuel}^{ch}$$

$$\begin{aligned} \bar{a}_{fuel}^{ch} = & [\bar{g}_{f(fuel)}^o + n_{o_2} \bar{g}_{f(o_2)}^o] \\ & - \left[ n_{co_2} \bar{g}_{f(co_2)}^o + n_{H_2O} \bar{g}_{f(H_2O)}^o \right] \\ & + \bar{R}T_o \ln\left(\frac{(y_{o_2}^e)^{n_{o_2}}}{(y_{co_2}^e)^{n_{co_2}} (y_{H_2O}^e)^{n_{H_2O}}}\right) \end{aligned}$$

$$A_{output} = A_{melted\ metal} + A_{stack\ gas} + A_{loss} \quad (۶)$$

$$= (A_{solid\ metal} + \Delta A_{metal}) + A_{stack\ gas} + A_{loss} \quad (۷)$$

$$\Delta A_{metal} = \Delta A_{metal}^{tm} + \Delta A_{metal}^{ch}$$

$$\Delta A_{metal}^{tm} = m[(h - h_o) - T_o(s - s_o)]_{metal}$$

که مقادیر آنتالپی اجزا بر اساس هر کیلوگرم فلز هستند. معادله به سه قسمت تقسیم می شود:

$\Delta A_{metal}^{tm} 1$  مربوط به انتقال گرما به فلز جامد:

$$\begin{aligned} \Delta A_{metal}^{tm} 1 &= m \left[ c_1(T_{f,1} - T_{i,1}) - T_o c_1 \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) \right]_1 \\ &= Q_{m1} - T_o m c_1 \left[ \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) \right]_1 \end{aligned}$$

و  $\Delta A_{metal}^{tm} 2$  مربوط به انتقال گرما به فلز مایع:

$$\Delta A_{metal}^{tm} 2 = Q_{m2} - T_o m c_2 \left[ \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) \right]_2$$

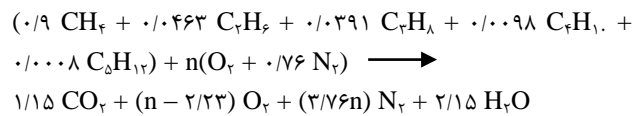
و  $\Delta A_{metal}^{tm} f$  مربوط به انتقال گرمای ذوب به فلز

$$\begin{aligned} \Delta A_{metal}^{tm} f &= m[c_1(h - h_o) - T_o(s - s_o)]_{metal\ fusion} \\ &= Q_{fusion} - mT_o(s - s_o)_{metal\ fusion} \end{aligned}$$

or

$$\Delta A_{metal}^{tm} f = Q_{fusion}(1 - T_o/T_f)$$

$$\Delta A_{metal}^{tm} = \Delta A_{metal}^{tm} 1 + \Delta A_{metal}^{tm} f + \Delta A_{metal}^{tm} 2$$



ضریب n در این معادله، با استفاده از نتایج آزمایش دودکش در کوره ۳/۱۴ معین می شود، که محصولات احتراق از نظر حجم  $O_2$  ۶٪ را شامل می شوند. نسبت هوا - سوخت واقعی بر اساس یک مول کوره  $\frac{A}{F} = \left(\frac{3.14}{1}\right) \times 4.76 = 14.95$  است و توسط اپراتورهای کوره با مشاهده رنگ شعله کنترل می شود.

### ۳.۷. موازنه ها و راندمان ها برای کوره

انرژی ورودی و خروجی کوره بر اساس شکل (۴) بدین صورت است:

$$E_{input} = E_{source} (E_{Fuel}) + E_{solid\ metal} + E_{comb\ air} \quad (۱)$$

$$E_{Fuel} = n_{(Fuel)} \bar{h}_{RP}^o$$

$$\bar{h}_{RP}^o (kJ/kmol\ fuel) = \sum_P n_e (h_f^o)_e - \sum_R n_i (h_f^o)_i$$

$$\sum_R n_i (h_f^o)_i = n_{Fuel} (\bar{h}_f^o)_{Fuel} + n_{O_2} (\bar{h}_f^o)_{O_2} + n_{N_2} (\bar{h}_f^o)_{N_2} = (\bar{h}_f^o)_{Fuel}$$

$$\sum_P n_e (h_f^o)_e = n_{CO_2} (\bar{h}_f^o)_{CO_2} + n_{O_2} (\bar{h}_f^o)_{O_2} + n_{N_2} (\bar{h}_f^o)_{N_2} + n_{H_2O} (\bar{h}_f^o)_{H_2O}$$

$$E_{output} = E_{melted\ metal} + E_{stack\ gas} + Q_{loss} \quad (۲)$$

$$= (E_{solid\ metal} + \Delta E_{metal}) + E_{stack\ gas} + Q_{loss} \quad (۳)$$

$$E_{melting} = Q_{melted\ metal} = Q_{m1} + Q_{fusion} + Q_{m2}$$

$$Q_{m1} = c_{p1} m (T_{f,1} - T_{i,1})$$

$$Q_{fusion} = n_{metal} \bar{c}_{f,alum}$$

$$Q_{m2} = c_{p2} m (T_{f,2} - T_{i,2})$$

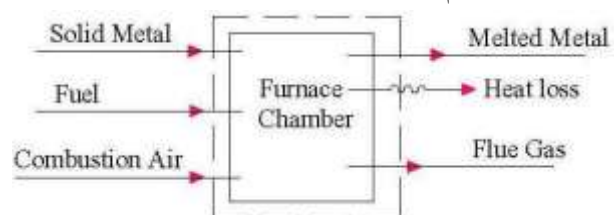
$$\begin{aligned} E_{flue\ gas} &= n_{(fuel)} \sum n_i (\bar{h}_T - \bar{h}_o)_i \\ &= n_{(fuel)} [n_{CO_2} (\bar{h}_T - \bar{h}_o)_{CO_2} + n_{O_2} (\bar{h}_T - \bar{h}_o)_{O_2} + n_{N_2} (\bar{h}_T - \bar{h}_o)_{N_2} \\ &\quad + n_{H_2O} (\bar{h}_T - \bar{h}_o)_{H_2O}] \end{aligned}$$

$$Q_{loss} = E_{input} - E_{transfer} = E_{input} - E_{melting} - E_{flue\ gas}$$

که  $E_{comb\ air} = E_{solid\ metal} = 0$  و یک موازنه انرژی می تواند بیان شود به صورت:

$$E_{input} = E_{output} \quad (۴)$$

اینجا  $E_{product}$  گرمای منتقل شده به فلز ذوب شده است،  $E_{input}$  انرژی تولید شده از احتراق سوخت است و  $E_{loss}$  همه انرژی اتلاف شده از سیستم است.



شکل (۴): جریان انرژی از میان سیستم کوره

به صورت زیر معین می شود.

$$Q_{loss} = E_{input} - \Delta E_{metal} - E_{stack\ gas} \quad (9)$$

اگر انرژی اتلافی متناظر در محفظه کوره با معادله (۱۰) محاسبه می شود.

$$A_{loss} = Q_{loss}(1 - T_0/T_{loss}) \quad (10)$$

$T_{loss}$  یک دمای میانگین فرضی از اتلاف گرمای دهانه کوره به محیط را بیان می کند. کل اتلاف گرما شامل اتلاف از بدنه کوره است. نشی از طریق درب و انتقال گرما به آب خنک کننده می شود. دمای میانگین یک مأخذی برای تخمین اتلاف انرژی توأم با اتلاف گرمای کلی است و در این مطالعه  $T_{loss} = 420\text{K}$  گرفته می شود. برای عملکرد کوره معمولی، مشاهده شده است که اتلاف گرمای کوره فقط اندکی تغییر می کند.

با معادلات (۵)، (۶)، (۷) و (۸)، تخریب انرژی در محفظه کوره به صورت زیر به دست می آید.

$$I_{cv} = A_{input} - A_{transfer} - A_{loss} \\ = A_{input} - (\Delta A_{metal} + A_{stack\ gas}) - A_{loss} \quad (11)$$

$I_{cv}$  تخریب انرژی<sup>۳</sup> عملیات احتراق، ذوب، آب خنک کننده و دیگر پدیده های اطراف محفظه کوره را در بر می گیرد. اتلاف و تخریب انرژی برای محفظه کوره را می توان به صورت ترکیب با هم در نظر گرفت [۱۷]، که در معادله زیر نمایش داده شده است:

$$A_{loss} + I_{cv} = A_{input} - A_{transfer} \\ = A_{input} - (\Delta A_{metal} + A_{stack\ gas}) \quad (12)$$

راندمان انرژی  $\eta$  کوره ذوب، نسبت انرژی محصول به انرژی ورودی است، در حالی که راندمان انرژی  $\varepsilon$  نسبت انرژی محصول به انرژی ورودی است.

$$\eta = \Delta E_{metal} / E_{fuel} \quad (13)$$

$$\varepsilon = \Delta A_{metal} / A_{fuel} \quad (14)$$

## ۸. نتایج و بحث ها

### ۱.۸. موازنه های انرژی و انرژی کوره

جداول (۲) و (۳) به ترتیب موازنه های انرژی و انرژی سیستم کوره را برای دوره عملکرد در نظر گرفته شده (۵۲ روز کاری) نشان می دهد.

انرژی شیمیایی استاندارد آلومینیوم، از ژارگوت<sup>۱</sup> (۱۹۸۸)،  $\bar{a}_{metal}^{ch} = 888,4\text{ kJ/kmol}$  است [۴۱]. تغییر انرژی شیمیایی فلز در کل مرحله ذوب شدن صفر است  $\Delta A_{metal}^{ch} = 0$ .

$$A_{flue\ gas} = (A_{flue\ gas}^{tm} + A_{flue\ gas}^{ch})$$

$$A_{flue\ gas}^{tm} = n_{fuel} \bar{a}_{flue\ gas}^{tm}$$

$$\bar{a}_{flue\ gas}^{tm} = \sum n_i [(\bar{h} - \bar{h}_0) - T_0(\bar{s} - \bar{s}_0)]_i$$

$$A_{flue\ gas}^{ch} = n_{fuel} \bar{a}_{flue\ gas}^{ch}$$

$$\bar{a}_{flue\ gas}^{ch} = \bar{R}T_0 \sum n_i \ln \left( \frac{y_i}{y_i^e} \right)$$

$$A_{loss} = Q_{loss}(1 - T_0/T_{loss})$$

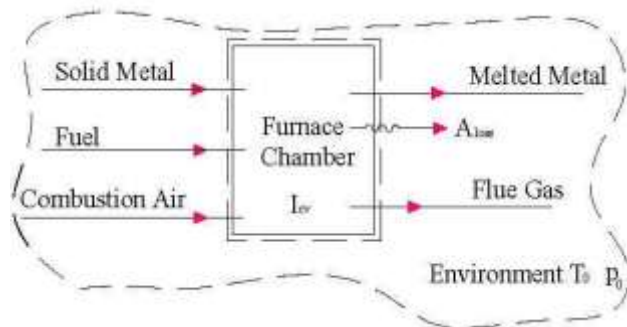
که  $A_{comb\ air} = 0$  و موازنه انرژی است:

$$A_{input} = A_{output} + I_{cv} \quad (8)$$

$$I_{cv} = A_{input} - A_{transfer} - A_{loss} \\ \text{or}$$

$$I_{cv} = A_{input} - (\Delta A_{metal} + A_{flue\ gas}) - A_{loss}$$

$A_{product}$  انرژی منتقل شده به فلز مذاب است.  $A_{input}$  انرژی تولید شده از احتراق سوخت است و  $A_{loss}$  انرژی وابسته به اتلاف انرژی سیستم است. انرژی پایدار نیست، بنابراین  $A_{input} > A_{output}$



شکل (۵): جریان انرژی از میان سیستم کوره در یک محیط مرجع

اتلاف انرژی (انرژی) در محفظه کوره،  $Q_{loss}$  (انرژی) وابسته به احتراق، ذوب و آب خنک کننده است. اتلاف انرژی (انرژی) در طرق مختلفی اتفاق می افتد؛ از جمله تابش گرمایی و همرفتی از طریق دیوارهای کوره و نشی از درهای کوره (شکل ۵). انرژی (انرژی) مربوط به آب خنک کننده همچنین قسمتی از اتلاف است.

اتلاف انرژی در محفظه کوره با موازنه انرژی از معادله (۴)

1. Szurgot
2. Energy(Exergy) Loss

۲.۸. راندمان‌های انرژی و آگزرژی کوره

با توجه به نتایج جداول (۲) و (۳)، مشاهده می‌شود راندمان‌های انرژی و آگزرژی کلی کوره به ترتیب ۱۰٪ ( $\frac{2.15}{21.4} \times 100\%$ ) و ۶٪ ( $\frac{1.22}{21.98} \times 100\%$ ) به دست می‌آید. در عملکرد واقعی، راندمان کوره ذوب ممکن است پایین‌تر از ۱۰٪ باشد؛ زیرا الکتریسیته در کل انرژی ورودی نادیده گرفته شده است. البته عوامل دیگر مثل زمان‌های کوتاه‌تر نگهداری مذاب و استفاده از شمش‌های بزرگ‌تر شارژ شده ممکن است راندمان انرژی را افزایش دهند.

جدول (۲): موازنه انرژی کوره

جریان انرژی		کمیت	
% of input	TJ/period		
۱۰۰	۲۱/۴۰	سوخت (گاز طبیعی)	
۰	۰/۰۰	هوای احتراقی	
۰	۰/۰۰	فلز جامد	
۱۰۰	۲۱/۴۰	کل ورودی	
۵۳	۱۱/۲۸	گاز دودکشی	
۱۰	۲/۱۵	فلز ذوب شده	
۳۷	۷/۹۷	اتلاف کوره	
۱۰۰	۲۱/۴۰	کل خروجی	

جدول (۳): موازنه آگزرژی کوره

جریان انرژی		کمیت	
% of input	TJ/period		
۰	۰/۰۱	آگزرژی	ترمو مکانیکی
۱۰۰	۲۱/۹۸	سوخت	شیمیایی
۰	۰	هوای احتراقی	
۰	۰	فلز جامد	
۱۰۰	۲۱/۹۸	کل ورودی	
۳۰	۶/۶۳	گاز دودکشی	
۶	۱/۲۲	فلز ذوب شده	
۱۱	۲/۳۱	اتلاف کوره	
۴۷	۱۰/۱۶	کل خروجی	
۵۳	۱۱/۸۲	تخریب آگزرژی	

انرژی اتلافی کلی، ۹۰٪ انرژی ورودی است. برگشت گرما به محیط از گاز دودکش مهم است؛ زیرا بیشتر از نصف انرژی خروجی است. اتلاف انرژی از محفظه کوره همچنین نیز مهم است؛ زیرا تقریباً ۴۰٪ انرژی ورودی است. آگزرژی فراهم شده برای فرایندها، ۲۱/۹۸ TJ، تقریباً همان انرژی فراهم شده است، به علت این حقیقت که انرژی شیمیایی و آگزرژی سوخت‌های فسیلی تقریباً مساوی هستند. آگزرژی حرارتی مکانیکی هر مول سوخت  $\frac{KJ}{kmol}$  ۳۲۲ است، و سهم آگزرژی حرارتی مکانیکی گاز طبیعی (۰/۰۵٪) در مقایسه با سهم آگزرژی شیمیایی کوچک است. آگزرژی شیمیایی هر مول سوخت  $\frac{KJ}{kmol}$  ۹۱۹۷۲۸ است و کل آگزرژی شیمیایی ورودی ۲۱/۹۷ TJ است. اتلاف آگزرژی شامل گسیل‌های هدررفته و تخریب‌های داخلی است. آگزرژی در گاز دودکش ۶/۶۳ TJ است، در حالی که اتلاف آگزرژی و تخریب از محفظه کوره ۱۴/۱۳ TJ است (۲/۳۱ TJ اتلاف آگزرژی کوره به علاوه ۱۱/۲۲ TJ تخریب آگزرژی). فرایندهای داخل محفظه کوره ۵۳٪ آگزرژی ورودی را تخریب می‌کند و اتلاف آگزرژی بیشتری را در سیستم نشان می‌دهد: این اتلاف مربوط به برگشت‌ناپذیری‌هایی در فرایندهای احتراق، انتقال گرما و ذوب است. اتلاف آگزرژی کلی ۲۰/۷۶ TJ ( $۶/۶۳+۲/۳۱+۱۱/۸۲$ ) حد دسترسی برای بهبود عملکرد کوره را نشان می‌دهد.

۹. نتیجه‌گیری

تحقیق درباره ذوب آلومینیوم با استفاده از روش انرژی و آگزرژی، بینش‌های بی‌شماری را آشکار کرد. راندمان انرژی کل سیستم ۱۰٪ و راندمان آگزرژی ۶٪ است. برگشت‌ناپذیری‌ها به دلیل احتراق گاز طبیعی، ذوب و آب خنک‌کننده اطراف محفظه کوره بیشتر از ۵۰٪ آگزرژی ورودی را تخریب می‌کند. آگزرژی حرارتی مکانیکی سوخت در مقایسه با آگزرژی شیمیایی بسیار کوچک است. نتایج تأکید می‌کند که آنالیز آگزرژی بیشتر عملی بوده و ابزاری است که بیشتر از آنالیز انرژی مرسوم برای آنالیز و مقایسه عملکرد کوره ذوب مفید است. بنابراین، تلاش‌هایی برای بهبود راندمان فرایندها باید صورت گیرد که ارزنده باشد.

برخی اقدامات برای بهبود راندمان کوره ذوب عبارت است از: اضافه کردن مشعل بازیاب و سیستم بازیاب انرژی، پیش‌گرم نمودن شمش‌ها، متراکم کردن گاز طبیعی، بازیابی گرما از آب خنک‌کننده، و جایگزین کردن هوای احتراقی.

راندمان اگزرژی	$\varepsilon$	زیر نویس ها	انرژی (TJ)	فهرست علائم
اتلاف	loss		انرژی اگزرژی (TJ)	E
حجم کنترل	CV		بازگشت ناپذیری (TJ)	A
اختلاف بین دو طرف واکنش	RP		گرما (TJ)	I
فلز جامد	$m_1$		آنتالپی (TJ)	Q
فلز مایع	$m_2$		آنتروپی (TJ/°K)	h
		بالا نویس ها	تعداد مول مصرف شده	s
حرارتی مکانیکی	tm		نسبت مولی	n
شیمیایی	ch		تابع گیبس (TJ)	y
			راندمان انرژی	g
				علائم یونانی
				$\eta$

## مراجع

- [۱] طالبی، حجت، «بهینه سازی مصارف انرژی مجموعه کارخانجات آلومینیوم پارس با استفاده از تحلیل و آنالیز اگزرژی»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، ۱۳۹۶.
- [2] Das, S. K. and Yin. W., "The Worldwide Aluminium Economy: The Current State of the Industry", Journal of the Mineral, Metals and Materials Society, Vol. 59, pp. 63-57, 2007.
- [3] Rosen, M. A. and Dincer, I., "On Exergy and Environmental Impact", International Journal of Energy Research, Vol. 21, pp. 643-654, 1997.
- [4] Dincer, I. and Rosen, M. A., "Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development", Elsevier, Oxford, UK, 2007.
- [5] Szargut, J., Morris, D. R. and Steward, F. R., "Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes", Hemisphere Publishing, New York, 1988.
- [6] Cengel, Y. A. and Boles, M. A., "Thermodynamics: An Engineering Approach", 6<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, 2008.
- [7] Stegou-Sagian, A. and Paigniannis, N., "Exergy Losses in Refrigerating Systems: A Study for Performance Comparisons in Compressor and Condenser", International Journal of Energy Research, Vol. 27, pp. 1067-1078, 2003.
- [8] Ratts, E. B. and Brown, J. S., "An Experimental Analysis of Cycling in an Automotive Air Conditioning System", Applied Thermal Engineering, Vol. 20, pp. 1039-1058, 2000.
- [9] Bejan, A., Tsatsaronis, G. and Moran, M. J., "Thermal Design and Optimisation", Wiley, New York, 1996.
- [10] Bejan, A., "Advanced Engineering Thermodynamics", 3<sup>rd</sup> edition, Wiley, New York, 2007.
- [۱۱] گودرزی، کوروش، بحرانی، مرتضی و هوشیار، هاشم، «تحلیل انرژی و اگزرژی کارخانه فولاد بویر صنعت یاسوج»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی دانشگاه کاشان، سال پنجم، شماره ۳، صفحه ۶۰-۶۹، ۱۳۹۴.
- [12] Hasanuzzaman, M., Saidur, R. and Rahim, N. A., "Analysis of Energy and Exergy of an Annealing Furnace", International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE 2010), 2010.
- [13] Guthrie, B. and Link, B., "In Reduction of Plant Emissions with High Efficiency, Low NO<sub>x</sub> Melting Design", North American Die Casting Association, 1999, Cleveland T99-091.
- [14] Shiramizu, K., "Steadily Meeting Voluntary Goals and Reducing Environmental Impact", Toyota, 2001 [http://www.toyota.co.jp/IRweb/corp\\_info/envrep/envrep00/pdf/c40\\_51.pdf](http://www.toyota.co.jp/IRweb/corp_info/envrep/envrep00/pdf/c40_51.pdf)
- [15] Moran, M. J. and Shapiro, H. N., "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", 6<sup>th</sup> Edition, Wiley, New York, 2007.
- [16] "Gas Engineers Handbook", Industrial Press, New York, 2008.
- [17] De, S., Roy, D. and Sarkar, A., "Performance Study of a Partial Gasification Pressurized Combustion Topping Gas Cycle and Split Rankine Combined Cycle: Part II – Exergy Analysis", International Journal of Energy Research, Vol. 27, pp. 561-574, 2003.