

# مروری بر روش‌های مکانیکی بازیابی حرارت سرباره‌های کارخانه‌های فولاد

طالب زارعی\*، ژاله پورعلی‌خان، ژیلا پورعلی‌خان

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

\*مسئول مکاتبات: talebzarei@hormozgan.ac.ir

## واژگان کلیدی

سرباره فولاد  
خرد کردن مکانیکی  
دمیدن هوا  
گریز از مرکز  
بازیابی حرارت

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۶/۰۸  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۳/۰۷

## چکیده

سرباره، محصولی غیرطبیعی و مصنوعی است. این محصول به هنگام تولید آهن یا فولاد در کوره‌های ذوب آهن به وجود می‌آید. سرباره خروجی از کوره‌ها دمایی حدود ۱۴۵۰ تا ۱۶۵۰ درجه سلسیوس دارد، در نتیجه دارای مقدار زیادی انرژی است. بازیابی این میزان انرژی، مصرف انرژی کارخانه‌های فولاد را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. یکی از روش‌های بازیابی حرارت سرباره، روش‌های مکانیکی است. بازیابی حرارتی با روش‌های مکانیکی دارای چند چالش اساسی از جمله هدایت حرارتی پایین، تمایل به تبلور و گسستگی دما-زمان در سرباره است. این مقاله یک نمای کلی از روش‌های مکانیکی را برای بازیابی انرژی سرباره ارائه می‌دهد. خرد کردن مکانیکی، دمیدن هوا و فرآیند دانه‌بندی گریز از مرکز چند روش مکانیکی برای بازیابی حرارت سرباره هستند، در این مقاله روند کار، معایب و مزایای هر کدام بررسی شده است.

## ۱ مقدمه

در دهه‌های اخیر بحث بازیافت و استفاده مجدد از مواد کم ارزش و باطله در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته چرا که علاوه بر حل مشکل زیست محیطی آن، از نظر اقتصادی نیز به صرفه است. یکی از این مواد باطله، سرباره تولید شده در صنایع آهن و فولاد است. سرباره از واکنش‌های پالایشی، مواد باقی‌مانده از سنگ معدن، فرسایش کوره و روغن اضافه حاصل می‌شود. تاکنون موارد مصرف سرباره‌ها بسیار محدود بوده است، این موارد شامل استفاده در زیرسازی جاده‌ها و راه‌آهن، ایجاد فرودگاه‌های صحرایی، ساخت آجر نسوز و ... است. سرباره مذاب در دمای ۱۶۵۰ درجه سلسیوس مقدار قابل توجهی انرژی حرارتی دارد. این انرژی معمولاً بازیافت نمی‌شود، زیرا سرباره، محصور و به آرامی سرد شده و گرانول شیشه‌ای برای تولید سیمان، حاصل می‌شود. صنعت فولاد حدود ۱۰٪ از تمام انرژی در دسترس انسان‌ها را مصرف می‌کند [۱]. بنابراین بازیابی حرارت سرباره از اهمیت زیادی برخوردار است. فروهان و همکاران میزان صرفه‌جویی انرژی را در صنعت فولاد برآورد کردند، آن‌ها متوجه شدند، می‌توان مصرف انرژی را حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش داد [۲]. امروزه چند روش سنتی و پیشرفته برای استخراج حرارت اتلافی از سرباره‌های دما بالا استفاده و بررسی شده است، این روش‌ها عموماً به روش‌های فیزیکی، روش‌های شیمیایی و روش‌های تولید الکتریسیته مستقیم تقسیم می‌شوند. روش‌های مکانیکی به عنوان یک روش سنتی، بر روی توسعه تکنولوژی دانه‌بندی تمرکز می‌کند، که در آن‌ها سرباره‌های مذاب به ذرات کوچکی دانه دانه می‌شوند و حرارت درون سرباره توسط یک واسطه انتقال حرارت (هوا، بخار آب و مواد تغییر فاز دهنده (PCM)) منتقل می‌شود. روش‌های دانه‌بندی عبارتند از جام دوار پودرکننده RCA، سیلندر

دوار پودرکننده RCLA، دمنده هوا و غیره [۳-۸]. هرچند بازیابی حرارت با روش‌های مکانیکی به دلیل وجود چالش‌های اساسی در کاربردهای صنعتی تحقق نیافته است. این چالش‌ها شامل هدایت حرارتی پایین، تمایل به تبلور و گسستگی دما-زمان می‌باشد. این مقاله یک نمای کلی از روش‌های مکانیکی را برای بازیابی انرژی سرباره ارائه می‌دهد. این روش‌ها ارزیابی می‌شوند تا امیدوارکننده‌ترین مسیر برای استفاده از گرمای تلف شده سرباره پیشنهاد شود.

## ۲ روش‌های مکانیکی برای دانه‌بندی خشک و بازیابی حرارت سرباره

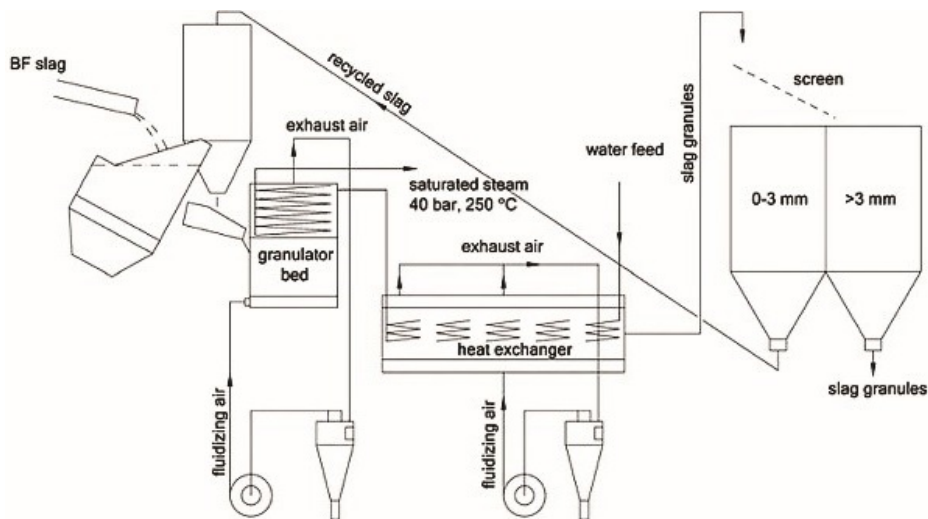
خرد کردن سرباره یک گام ضروری برای بازیابی حرارت سرباره است. سه روش مکانیکی برای خرد کردن و بازیابی حرارت سرباره رایج است: روش خرد کردن مکانیکی، روش دمیدن هوا و روش دانه‌بندی گریز از مرکز.

### ۱.۲ روش‌های خرد کردن مکانیکی

در تحقیقات اولیه در مورد دانه‌بندی خشک، بیشترین فعالیت‌ها روی روش‌های خرد کردن مکانیکی متمرکز شده است. در بین این تکنیک‌ها روش غلتک دوار بیشترین سهم را دارد.

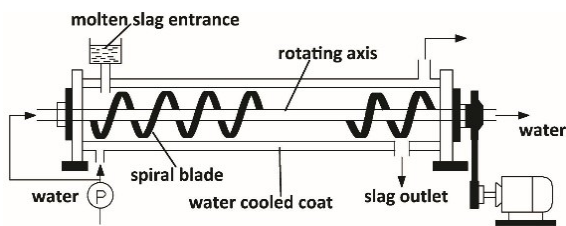
#### ۱.۱.۲ فرآیند برخورد سرباره جامد

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده این فرآیند به خرد کردن جریان سرباره مایع در اثر برخورد با ذرات جامد اشاره می‌کند. این فرآیند توسط گروه سوئدی میروتیک ارائه شده است [۹]. در این فرآیند جریان سرباره مایع در اثر برخورد با



شکل ۱: فرآیند برخورد سرباره جامد [۱۱]

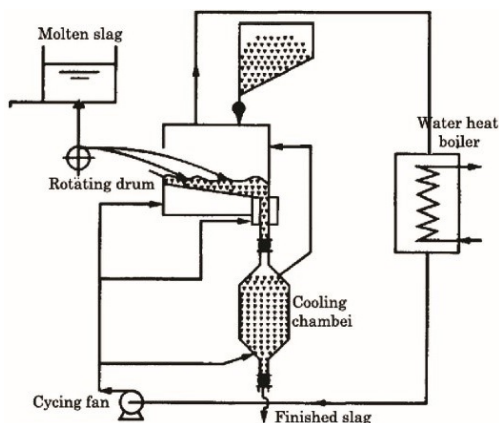
در این مرحله حرارت سرباره از طریق انتقال حرارت جابه‌جایی به هوا منتقل می‌شود. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده اندازه ذرات تولید شده عمدتاً کمتر از ۶ میلی‌متر است و ذرات با اندازه ۰/۳ میلی‌متر به دستگاه دانه‌ساز برگردانده می‌شوند. این فرآیند بخار اشباع با دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس تولید می‌کند و نرخ بازیابی آن حدود ۶۵٪ است، از آنجا که بازیابی انرژی بسیار کم است، این فرآیند برای استفاده تجاری بلند مدت مناسب نیست [۱۱، ۱۰].



شکل ۳: روش همزن مکانیکی توسعه یافته توسط سومیتومو متال [۱۴]

### ۳.۱.۲ روش غلتک دوار

روش غلتک دوار<sup>۱</sup> بر اساس تأثیر مکانیکی چرخش غلتک روی فیلم سرباره ابداع شده است. اولین روش غلتک دوار در اوایل سال ۱۹۸۰ توسط شرکت‌های ژاپنی صنایع سنگین ایشیکاوا و اچیمائی هریما و سومیتومو متال طراحی شد (شکل ۴) [۴-۶، ۱۳].

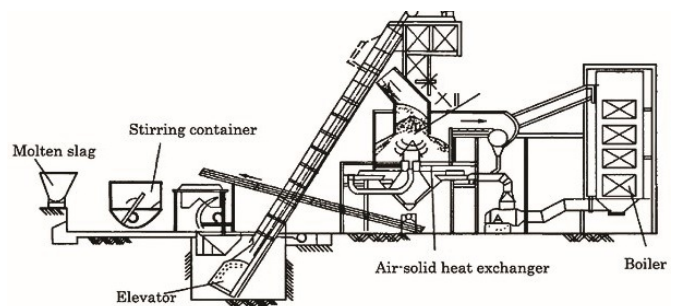


شکل ۴: روش غلتک دوار [۱۳]

ذرات جامد سرباره‌ای که قبلاً بازیافت شده به ذرات کوچک شکسته می‌شود، در این مرحله حرارت سرباره از طریق انتقال حرارت جابه‌جایی به هوا منتقل می‌شود. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده اندازه ذرات تولید شده عمدتاً کمتر از ۶ میلی‌متر است و ذرات با اندازه ۰/۳ میلی‌متر به دستگاه دانه‌ساز برگردانده می‌شوند. این فرآیند بخار اشباع با دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس تولید می‌کند و نرخ بازیابی آن حدود ۶۵٪ است، از آنجا که بازیابی انرژی بسیار کم است، این فرآیند برای استفاده تجاری بلند مدت مناسب نیست [۱۱، ۱۰].

### ۲.۱.۲ فرآیند همزن مکانیکی

در فرآیند همزن مکانیکی، سرباره مذاب توسط میله یا پره در حال حرکت هم زده و خرد می‌شود. شرکت فولاد ژاپنی کاواساکی یک نوع روش هم زدن را مطابق شکل ۲ اختراع کرده است [۱۲، ۱۳]. سرباره مذاب توسط میله همزن در یک ظرف کاسه مانند خرد می‌شود و حرارت سرباره از طریق انتقال حرارت تشعشعی و هدایتی به لوله‌های آب اطراف ظرف منتقل می‌شود. بعد از آن سرباره دانه شده در بستر سیال تخلیه و انرژی باقی مانده آن آزاد می‌شود. در نهایت هوای داغ به یک بویلر حرارتی می‌رسد. در این فرآیند انرژی بازیابیده حدود ۵۹٪ انرژی سرباره است.

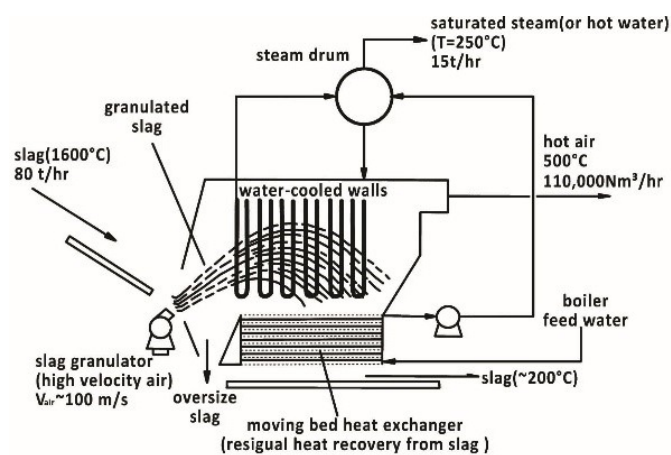


شکل ۲: فرآیند همزن مکانیکی توسعه یافته توسط شرکت فولاد کاواساکی [۱۲]

سومیتومو متال فرآیند همزن دیگری ابداع کرده که طرح آن در شکل ۳ نشان داده شده است [۳، ۱۴]. در این روش سرباره مذاب توسط پره‌های چرخان هم زده و به دانه‌های ریز خرد می‌شود، همزمان حرارت از طریق انتقال

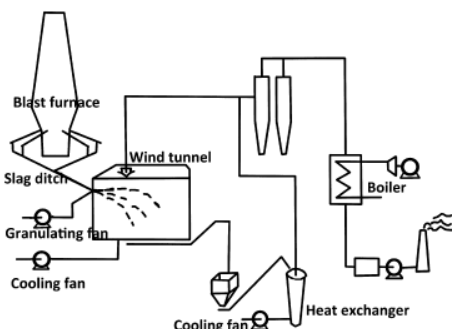
<sup>1</sup>Rotating drum process

کوچک خرد می‌کند، در این مرحله حرارت بسیار زیادی به دیواره‌های آب سرد<sup>۵</sup> منتقل می‌شود. سپس دانه‌های سرباره به یک بویلر تغذیه می‌شوند. ضمناً یک مبدل حرارتی با بستر متحرک<sup>۶</sup> طراحی شده تا حرارت باقی مانده سرباره را بازیابی کند. در اوایل سال ۱۹۹۰ این روش در مقیاس تجاری با ظرفیت دانه‌بندی ۲۰ تن سرباره در ساعت و در حالت ماکسیمم ۸۰ تن در ساعت آزمایش شد. در این آزمایش اندازه دانه‌های سرباره کمتر از ۳ میلی‌متر بود و میزان مصرف هوای فشرده ۱۰۰۰ متر مکعب به ازای هر تن سرباره بود [۲۰]. در این آزمایش ۴۱٪ از حرارت سرباره توسط بخار و ۳۹٪ از بقیه حرارت توسط هوا بازیابی شد. دانه‌های ریز تولید شده در این روش قابل استفاده هستند، اما به دلیل مصرف مقدار زیادی هوای فشرده، دمای هوای خروجی نسبتاً کم است، در نتیجه سود اقتصادی پایینی دارد، بنابراین هیچ برنامه‌ی بیشتری برای این فرآیند گزارش نشده است.



شکل ۶: روش دمیدن هوای اختراع شده توسط صنایع بزرگ میتسوبیشی و انکیکی [۱۶]

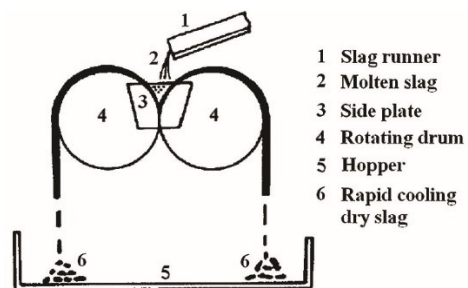
شش شرکت فولاد بزرگ ژاپنی در سال ۱۹۸۲ یکی از روش‌های دمیدن هوا را توسعه دادند. (شکل ۷) [۲۱، ۸، ۳]. مکانیسم آن شبیه فرآیند انکیکی است، اما فقط هوا به عنوان واسطه‌ی بازیابی حرارت استفاده می‌شود. هوای داغ به دست آمده مستقیماً برای تولید برق استفاده می‌شود. این روش به صورت صنعتی با ظرفیت ۱۸ تن سرباره در هر ساعت آزمایش شد، در این آزمایش دمای هوای داغ ۴۵۰ - ۵۰۰ درجه سلسیوس و نرخ بازیابی حرارت ۴۸٪ بدست آمد، همچنین محتوای شیشه‌ای سرباره بیشتر از ۹۵٪ شد. این فرآیند به علت پیچیدگی تجهیزات، مصرف انرژی زیاد و زمان باز پرداخت طولانی (حدود ۵/۵ سال) متوقف شد.



شکل ۷: روش دمیدن هوای توسعه یافته توسط شش شرکت فولاد ژاپنی [۳]

در این روش سرباره مذاب روی یک غلتک دوار میریزد و به علت ضربه مستقیم می‌شکند. پس از آن، سرباره خرد شده به دلیل نیروی گریز از مرکز به درون دریچه پرتاب می‌شود، سپس در محفظه خنک کننده<sup>۱</sup> حرارت سرباره به هوا منتقل می‌شود. هوا تا دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس گرم می‌شود و نرخ بازیابی حرارت نیز به ۶۰٪ می‌رسد.

در سال ۱۹۸۴، شرکت ژاپنی انکیکی یک سیستم دو غلتکه<sup>۲</sup> مطابق شکل ۵ طراحی کرد [۷]. اجزای اصلی این سیستم، دو غلتک دوار مختلف جهت است. جریان سرباره مذاب در شکاف بین دو غلتک ریخته می‌شود و غلتک‌ها با چرخش در جهت پایین دادن سرباره، آن را خرد می‌کنند. ضمناً بین سرباره و مایع خنک کننده درون غلتک‌ها انتقال حرارت صورت می‌گیرد. در نهایت، بخار مایع خنک کننده به بویلر حرارتی داده می‌شود. این روش در یک مقیاس بزرگ آزمایش شد و نرخ بازیابی حرارت ۴۰٪ و محتوای فاز شیشه‌ای ۸۰٪ بدست آمد. برای زدودن سرباره‌ها از غلتک، یک ابزار لایه تراش<sup>۳</sup> نیاز است، در غیر این صورت تبادل حرارت به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. استفاده از روش غلتک دوار به علت بازیابی اکسرژی کم و ناپایداری عملیات متوقف شده است.



شکل ۵: روش دو غلتکه [۷]

## ۴.۱.۲ وضعیت روش خرد کردن مکانیکی

در سال‌های اخیر، استفاده از روش خرد کردن مکانیکی به دلایل زیر کم شده است [۱۵]:

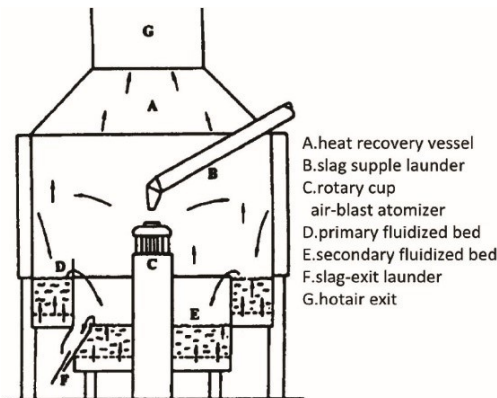
۱. تقاضا برای استفاده از سرباره دانه شده کم است و ذرات سرباره با سایز بزرگ و غیر یکنواخت برای استفاده‌های بعدی مناسب نیست. بنابراین در بعضی از روش‌های خرد کردن مکانیکی باید یک فرآیند خرد کردن اضافی به کار گرفت، که مصرف انرژی را افزایش می‌دهد.
۲. دمای سرباره خنک شده خروجی، نسبتاً بالا (۵۰۰ - ۹۰۰ درجه سلسیوس) است، در نتیجه نرخ بازیابی حرارت کم است.

## ۲.۲ روش دمیدن هوا

در روش دمیدن هوا<sup>۴</sup> از گاز پرسرعت و پرفشار برای خرد کردن جریان سرباره مذاب استفاده می‌شود، در واقع با خنک کردن سریع، سرباره به مجموعه‌ای از ذرات ریز خرد می‌شود. در اوایل سال ۱۹۷۷، صنایع سنگین میتسوبیشی و انکیکی یک کارخانه آزمایشی در کارخانه انکیکی فوکویاما ساختند، و این روش را به منظور بازیابی حرارت سرباره مایع بررسی کردند. (شکل ۶) [۱۱، ۱۶-۱۹]. در این روش جریان هوای پرسرعت، سرباره را به دانه‌های

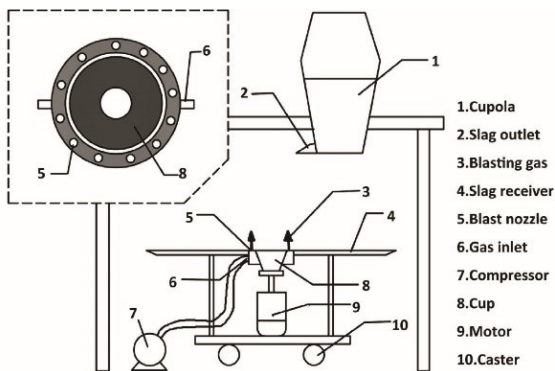
<sup>1</sup>cooling chamber <sup>2</sup>twin drum <sup>3</sup>stripping tool <sup>4</sup>Air blast method <sup>5</sup>water-cooled walls <sup>6</sup>moving bed heat exchanger

هوای داغ بدست می‌آید. اولین مدل از جام دوار پودرکننده توسط پیکرینگ و همکارانش در انگلستان در سال ۱۹۸۰ مطابق شکل ۹ ارائه شد [۲۳، ۱۰]. در این پودرکننده، ابتدا سرباره توسط جام چرخان دانه‌بندی می‌شود. بعد از آن ذرات تولید شده درون اولین بستر سیال قرار می‌گیرند و با عبور هوا، خیلی سریع خنک شده و فاز شیشه‌ای تشکیل می‌شود. سپس ذرات، درون دومین بستر سیال ریخته می‌شوند، در آنجا حرارت بیشتری بازیابی می‌شود. در نهایت ذرات تشکیل شده، قطر متوسط ۲ میلی متر و محتوای شیشه‌ای ۹۵٪ دارند. در یک آزمایش تجاری موفق، حدود ۵۹٪ از حرارت سرباره بازیابی شد و ذرات سرباره تا دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس خنک شدند [۲۴].



شکل ۹: روش جام دوار توسعه یافته توسط پیکرینگ [۱۰]

فرآیند پیکرینگ تا حد زیادی به استفاده از روش RCA کمک کرد. در سال ۲۰۰۱ میزوچی نوع دیگری از روش RCA را مطابق شکل ۱۰ طراحی کرد [۲۵].



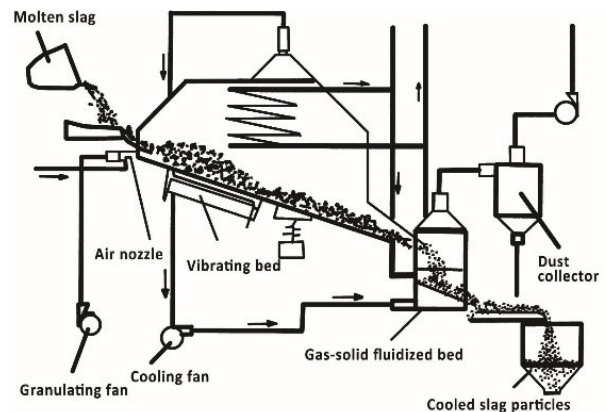
شکل ۱۰: روش جام دوار میزوچی [۲۵]

در این روش چند نازل هوا روی لبه‌ی جام تعبیه می‌شود. وقتی که سرباره مذاب از جام به بیرون پرتاب می‌شود، هوا از نازل دمیده می‌شود و سرباره را خرد می‌کند. بنابراین، سرباره مذاب اساساً توسط ترکیب اعمال جام دوار و دمیدن هوا دانه‌بندی می‌شود. اثرات سرعت روتور، ویسکوزیته سرباره و نرخ جریان گاز روی اندازه ذرات سرباره بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد:

۱. افزایش سرعت چرخش جام، نیروی گریز از مرکز قویتری ایجاد می‌کند، در نتیجه سرباره به ذرات کوچکتری دانه‌بندی می‌شود. وقتی که سرعت در محدوده‌ی ۱۰-۳۰ rad/s تنظیم شده باشد، تأثیر قابل توجهی روی اندازه ذرات سرباره (در محدوده ۱-۶ میلی‌متر)

<sup>1</sup>Rotating cup atomizer

موسسه فولاد اورال روسیه، فرآیند دمیدن هوای اینکیکی را برای کاربردهای صنعتی بهبود داد. همانطور که در ۸ نشان داده شده این سیستم دارای یک بستر مرتعش و یک بستر سیال است. سرباره مذاب قبل از ورود به بستر مرتعش به وسیله نازل هوا دانه‌بندی می‌شود. از بستر مرتعش برای پایین بردن سرباره و جلوگیری از اتصال ذرات استفاده می‌شود. بستر سیال هم نرخ بازیابی حرارت را بهبود می‌بخشد و دمای ذرات سرباره به ۱۶۰-۲۰۰ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد [۱۴، ۲۲].



شکل ۸: روش دمیدن هوای اصلاح شده توسط موسسه فولاد اورال روسیه [۱۴]

### ۱.۲.۲ وضعیت روش دمیدن هوا

روش دمیدن هوا برای دانه‌بندی سرباره از روش خرد کردن مکانیکی بهتر است. هرچند خط تولید دمیدن هوا، به دلایل زیر متوقف شده است:

۱. تجهیزات مورد نیاز برای این روش پیچیده هستند و انرژی زیادی مصرف می‌کنند.
۲. در روش دمیدن هوا، سرباره باید سیالیت خوبی داشته باشد، اما به دلیل توسعه تکنولوژی فولادسازی، حالت بنیانی سرباره بیشتر و ویسکوزیته آن افزایش می‌یابد.

با این وجود، بسیاری از کارخانه‌های فولاد برای اصلاح این روش و عملی کردن آن تلاش کردند. فرآیند اصلاح شده دمیدن هوا با اصل آن کاملاً متفاوت است. سرباره مایع توسط هوا دانه‌بندی و درون یک استخر آب رها می‌شود. این نوع کاملاً خشک نیست اما ترکیبی از دمیدن هوا و آب است.

### ۳.۲ روش دانه‌بندی گریز از مرکز

در این روش اساس خرد کردن سرباره، نیروی گریز از مرکز است. این نیرو از طریق اجزاء متفاوتی مثل جام، دیسک و سیلندر دوار به سرباره منتقل شده و به خرد کردن سرباره کمک می‌کند.

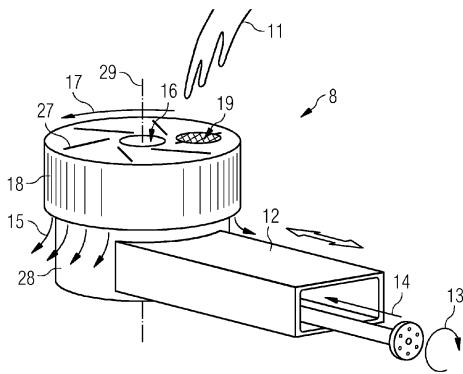
### ۱.۳.۲ روش جام دوار پودرکننده RCA<sup>۱</sup>

در این روش سرباره مایع مستقیماً درون جام دوار ریخته می‌شود، سپس سرباره به صورت شعاعی به سمت بیرون پرتاب می‌شود، در این مرحله ذرات به علت نیروی گریز از مرکز و کشش سطحی شکل می‌گیرند. به طور هم‌زمان هوا از پایین برای خنک کردن ذرات دمیده می‌شود. در نهایت ذرات جامد ریز و



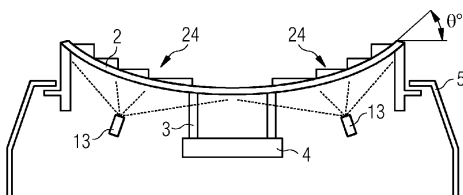
سلسیوس خنک و فاز شیشه‌ای تشکیل می‌شود. در مرحله دوم ذرات سرباره به درون یک مبدل حرارتی با بستر طبقه‌بندی شده تخلیه می‌شوند و جریان هوای ثانویه، سرباره را تا دمای ۵۰ درجه سلسیوس خنک می‌کند. هوای داغ بدست آمده از هر دو مرحله، دمایی بالاتر از ۶۰۰ درجه سلسیوس دارد، هوای داغ خروجی برای تولید بخار استفاده می‌شود. این پروژه در سال ۲۰۱۰ تمام شد و به زودی به استفاده صنعتی می‌رسد. همچنین در چین روش SDA توسط یانگ و همکارانش بررسی شد [۳۲]. آن‌ها مشاهده کردند در سرعت‌های بسیار بالا به جای ذرات سرباره، ابریشم شیشه تولید می‌شود، ابریشم شیشه کاربرد چندانی ندارد. همچنین نتایج نشان داد، بازه بهینه در سرعت ۲۰۰۰ rpm بدست می‌آید.

نوع دیگری از دیسک دوار مطابق شکل ۱۲ ارائه شده است. در این مدل تعدادی برآمدگی روی سطح دیسک وجود دارد. سرباره روی نقطه‌ای مشخص از صفحه فرود می‌آید، این نقطه باید حداقل ۱۰٪ شعاع دیسک از محور فاصله داشته باشد، در بهترین حالت این فاصله بین ۲۰ - ۴۰٪ شعاع است. سرعت چرخش دیسک ۸۰۰ - ۲۰۰۰ rpm است [۳۴].



شکل ۱۲: دیسک دوار دارای برآمدگی [۳۴]

دستگاه دیگری از مدل دیسک دوار در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این مدل، دیسک به صورت مقعر و پل‌های است، چند سیستم خنک کننده زیر دیسک قرار دارد و آن را خنک می‌کند. در این مدل، قطر دیسک با توجه به نرخ جریان سرباره و سرعت چرخش دیسک انتخاب می‌شود، همچنین زاویه بین خط مماس در لبه دیسک و خط وتر ( $\theta$ ) باید بین ۳۰ تا ۵۰ درجه باشد [۳۵].



شکل ۱۳: دیسک دوار مقعر [۳۵]

### ۳.۳.۲ روش سیلندر دوار بودرکننده RCLA<sup>۲</sup>

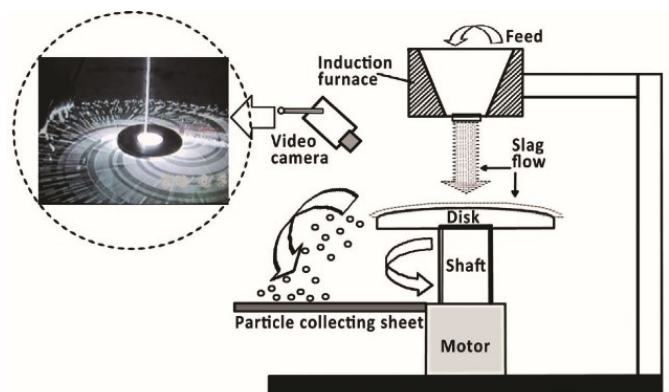
در سال ۲۰۱۰ کاشیویا و همکاران، فرآیند RCLA را بر اساس مکانیزم RCA ابداع و اثر اندازه نازل را روی قطر ذرات بررسی کردند. (شکل ۱۴) [۳۶، ۳۷]. این دستگاه شامل یک سیلندر دوار و ظرف آهنگری گرافیتی است،

می‌گذارد. هرچند در سرعت‌های بالاتر از ۳۰ rad/s اثر سرعت، کم می‌شود.

۲. با کاهش ویسکوزیته سیال اندازه ذرات کوچکتر می‌شود.
۳. استفاده از جریان هوا با سرعت بالا باعث کاهش قطر ذرات سرباره و افزایش محتوای شیشه‌ای می‌شود. نرخ جریان هوا نسبت به ویسکوزیته سرباره، به علت ایجاد نیروی ضرب‌های قوی و سرمایش سریع تأثیر بیشتری روی دانه‌بندی دارد.
۴. بر اساس نتایج آزمایش، زاویه جام تأثیر کمی روی دانه‌بندی دارد. یو و همکارانش در دانشگاه نورت‌وست به طور ویژه‌ای روی رابطه بین قطر جام دوار و اندازه ذرات مطالعه کردند، آن‌ها دریافتند که در سرعت کمتر از ۱۰۰۰ rpm اگر لبه‌ی بیرونی جام بزرگتر باشد، متوسط قطر ذرات کوچکتر می‌شود، هنگامی که سرعت چرخش بیشتر از ۱۰۰۰ rpm باشد، اثر اندازه جام عادی است [۲۶، ۲۷].

### ۲.۳.۲ روش دیسک دوار بودرکننده SDA<sup>۱</sup>

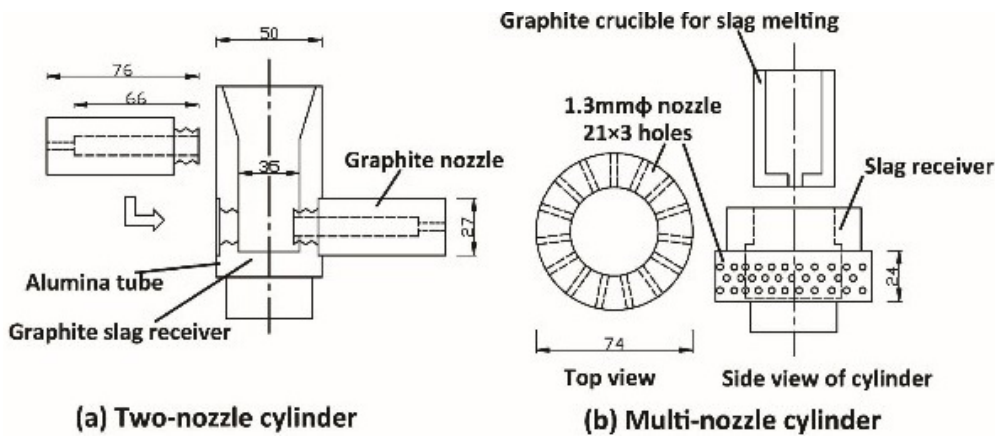
در این روش، سرباره توسط یک دیسک دوار بودرکننده دانه‌بندی می‌شود. تفاوت بین فرآیندهای RCA و SDA در ساختار دانه‌بندی آن‌هاست. دیسک دوار بودرکننده، مثل فرآیند RCA سرباره را به دلیل نیروی گریز از مرکز دانه‌بندی می‌کند. دستگاه طراحی شده توسط آکیاما و همکارانش در شکل ۱۱ نشان داده شده است [۲۸]. ابتدا سرباره مایع به صورت یک فیلم بر روی دیسک گسترده می‌شود، سپس به صورت تعداد زیادی نوار به صورت شعاعی خارج می‌شود. سرانجام نوارها به ذرات کوچک شکسته می‌شوند. اثرات سرعت روتور، ویسکوزیته سرباره و نرخ جریان گاز روی اندازه ذرات سرباره، مثل فرآیند RCA است. این فرآیند، ذرات ریزی به اندازه ۰/۶ تا ۰/۸ میلی‌متر تولید می‌کند.



شکل ۱۱: دستگاه آزمایشی دیسک دوار [۳۳]

این آزمایش توسط پورواتو و همکاران در سال ۲۰۰۴ شبیه‌سازی شد [۲۹]. در این شبیه‌سازی توزیع دما و قطر ذرات پیشینی و بررسی شد، اما نتیجه خاصی مبنی بر اینکه کدام یک از دو روش RCA و SDA بهتر است، بدست نمی‌آمد. اعضای گروه CSIRO در استرالیا از سال ۲۰۰۲ روی فرآیند SDA کار می‌کنند تا آن را توسعه دهند [۳۰، ۳۱]. روش آن‌ها از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول سرباره مذاب با دیسک چرخان دانه‌بندی می‌شود، سپس ذرات سرباره توسط جریان هوای مغشوش تا دمای ۹۰۰ درجه

<sup>1</sup>Spinning disk atomizer    <sup>2</sup>Rotating cylinder atomizer



شکل ۱۴: سیلندر دوار دو نازل و چند نازلی [۳۷]

## ۴.۲ دیگر روش‌های مکانیکی

برای بازیابی حرارت سرباره، روش‌های دیگری نیز وجود دارند که در دسته‌بندی‌های بیان شده قرار نمی‌گیرند؛ در ادامه به چند مورد اشاره می‌شود.

### ۱.۴.۲ بازیابی حرارت سرباره توسط مواد تغییر فاز دهنده (PCMها<sup>۱</sup>)

هوا و آب نوعی واسطه انتقال حرارت برای بازیابی حرارت سرباره در فرآیندهای مذکور هستند. به تازگی مواد تغییر فاز دهنده برای استخراج حرارت سرباره مورد توجه قرار گرفته‌اند. پس این مواد برای فرآیندهای دانه‌بندی، یک انباره حرارتی با دمای ثابت محسوب می‌شوند [۳۸]. هرچند مطالعه روی بازیابی حرارت توسط مواد تغییر فاز دهنده فقط برای گازهای اتلافی در صنعت انجام شده است. هیچ آزمایشی برای بازیابی حرارت سرباره با این روش گزارش نشده است.

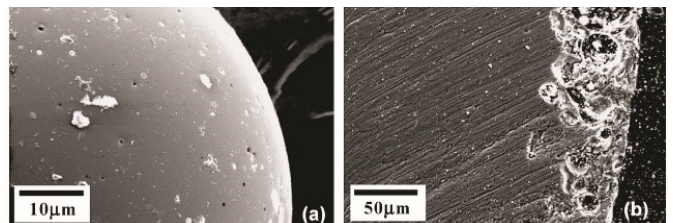
### ۲.۴.۲ بازیابی حرارت توسط مواد ترموالکتریک

تبدیل مستقیم انرژی حرارت اتلافی به قدرت ترموالکتریکی توسط رُو و همکارانش ارائه شده است [۳۹]. این روش یک راهکار سازگار با محیط زیست، ایمن و قابل اعتماد برای تبدیل مستقیم حرارت اتلافی به برق می‌باشد. با ظهور نیمه رساناهای مدرن با ضریب سیبک<sup>۲</sup> چند صد میکرو ولت در هر درجه، این تکنولوژی برای بازیابی حرارت اتلافی، امیدوارکننده به نظر می‌رسد.

### ۳.۴.۲ خرد کننده چند مرحله‌ای

در دستگاه نشان داده شده در شکل ۱۶ سرباره مایع با دمای حدود ۱۵۰۰ درجه سلسیوس درون قالب‌های دستگاه مخلوطکن ریخته می‌شود [۴۱، ۴۰]. ذرات فلزی با سایز ۲ - ۵۰ میلی‌متر و دمای حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس از مخزن اول که بالای دستگاه مخلوطکن قرار دارد به درون قالب‌ها ریخته و با سرباره مایع مخلوط می‌شود. یک دستگاه مکنده نیز بالای مخلوطکن قرار دارد و گرد و غبار بلند شده در طول عملیات را مکش می‌کند. سپس سرباره با دمایی حدود ۸۰۰ درجه سلسیوس به صورت قالبی از مخلوطکن خارج و روی نوار نقاله قرار می‌گیرد، در این مرحله اندازه ذرات سرباره حدوداً ۲۰۰

ظرف گرافیتی دارای سیم‌پیچ القایی برای گرمایش و ذوب سرباره است. همچنین چند ردیف سوراخ در پایین سیلندر وجود دارد. در این روش سرباره تحت فشار قرار می‌گیرد و با خروج از سوراخ‌ها دانه‌بندی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، نازل‌های کوچکتر، سرباره را به ذرات کوچکتری دانه‌بندی می‌کنند، اما قطر ذرات با اندازه نازل همسان نیست. وقتی که اندازه نازل ۱، ۱/۳ و ۲ میلی‌متر هست قطر ذرات به ترتیب ۰/۹، ۱ و ۱/۸ میلی‌متر بدست می‌آید. همچنین ریزساختار ذرات تشکیل شده در این روش بررسی شد. همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده تعداد زیادی سوراخ روی سطح و حباب‌های زیادی هم زیر سطح ذرات وجود دارد. به طور کلی در فرآیند RCLA می‌توان کنترل دقیق‌تری روی دانه‌بندی داشت، اما فاکتورهای مؤثری مثل اندازه نازل و نرخ جریان سرباره، فرآیند را پیچیده‌تر می‌کنند.

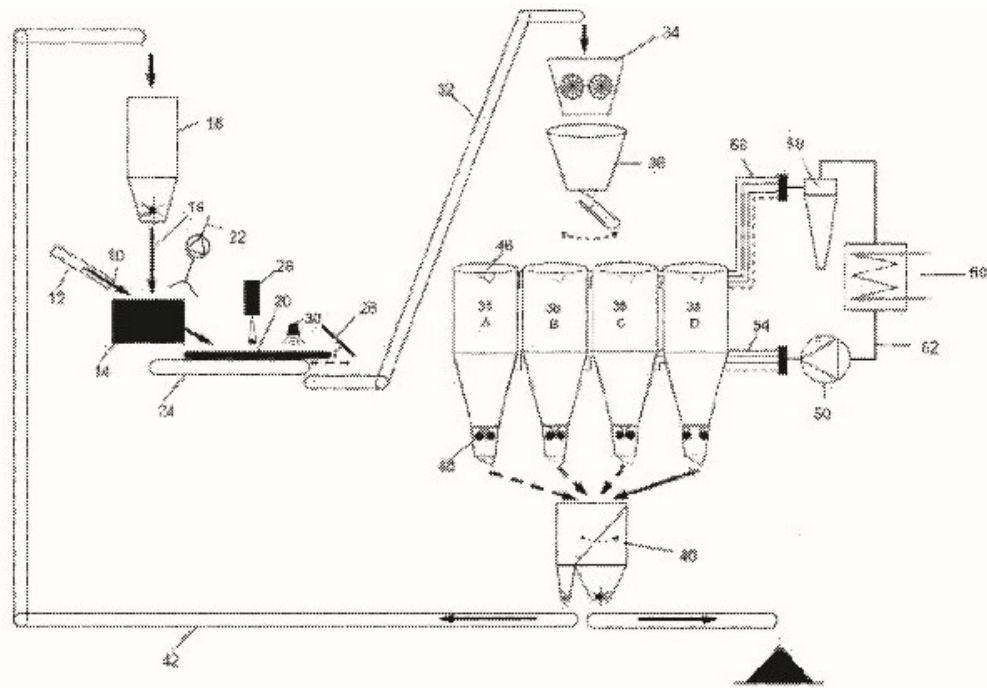


شکل ۱۵: میکرو ساختار ذرات خنک شده [۳۶]

### ۴.۳.۲ وضعیت روش دانه‌بندی گریز از مرکز

برای استفاده مجدد از سرباره و بازیابی انرژی آن، دانه‌بندی یک مرحله مهم است و به طور مستقیم به ارزش ذرات تولید شده از سرباره و بازده انتقال حرارت مربوط است. روش دانه‌بندی گریز از مرکز با توجه به مصرف انرژی پایین و تجهیزات ساده و متراکم در مقایسه با روش‌های خرد کردن مکانیکی و دمیدن هوا، اهمیت بیشتری دارد. ضمناً کیفیت و سایز ذرات سرباره را می‌توان توسط پارامترهایی از قبیل سرعت چرخش، اندازه دانه‌ساز، نرخ جریان هوا و ... کنترل نمود. علاوه بر این، روش دانه‌بندی گریز از مرکز با دستگاه‌های مختلف بازیابی حرارت قابل ترکیب است. تا کنون روش‌های دانه‌بندی گریز از مرکز خارج از آزمایشگاه انجام نشده‌اند اما به زودی با مطالعات بیشتر روی این تکنولوژی، ساخت آن محقق می‌شود.

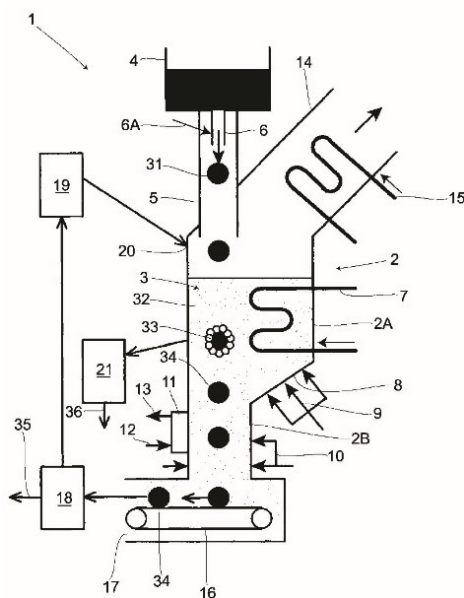
<sup>1</sup>phase change materials <sup>2</sup>Seebeck



شکل ۱۶: خردکننده چند مرحله‌ای [۴۰]

عنوان محصول خارج می‌شود. زیر سطح بستر، دستگاه برداشت سرباره جامد قرار دارد، که ذرات سرباره جامد را خارج می‌کند. در این روش اندازه ذرات سرباره به  $0/1 - 3$  میلیمتر می‌رسد و دمای بستر سیال حدود  $700 - 1000$  درجه سلسیوس است.

میلیمتر است. در طول مسیر نقاله دمای قالب اندازه‌گیری می‌شود، در صورتی که دمای آن بیشتر از  $800$  درجه سلسیوس باشد، روی آن آب پاشیده می‌شود. قالب‌ها توسط نوار نقاله به تیغه خرد کننده منتقل می‌شوند. قطعات خرد شده قالب توسط بالابر مکانیکی به خرد کننده دوم منتقل می‌شوند و اندازه آن‌ها به  $40 - 80$  میلیمتر می‌رسد. سپس از طریق یک کانال، درون مبدل‌های حرارتی تخلیه می‌شوند. در این مبدل‌ها معمولاً از هوا به عنوان گاز خنک کننده استفاده می‌شود، و دمای ذرات سرباره به  $100$  درجه سلسیوس می‌رسد. هوای خارج شده از این مبدل‌ها برای بازیابی حرارت به مبدل حرارتی دیگری منتقل می‌شود. سرباره‌ها درون کانال بعدی ریخته می‌شوند، در این کانال ذرات فلزی از ذرات سرباره جدا و به مخزن اول برگردانده می‌شوند. ذرات سرباره نیز به عنوان محصول نهایی خارج می‌شوند.



شکل ۱۷: دستگاه بازیابی حرارت از بستر سرباره [۴۱]

#### ۴.۴.۲ دستگاه بازیابی حرارت از بستر سرباره

دستگاه نشان داده شده در شکل ۱۷ با اینکه ساختار ساده‌ای دارد، بازده بازیابی حرارت آن بالاست. این دستگاه شامل بستر سیال، مخزن سرباره برای تغذیه سرباره مذاب به بستر سیال و دستگاه برداشت سرباره جامد می‌باشد.

در این دستگاه سرباره مذاب درون مخزن به صورت قطره‌ای توسط نازل به بستر سیال ریخته و در این بستر منجمد می‌شود [۴۲]. حرارت سرباره توسط لوله‌های انتقال حرارت بازیابی می‌شود. ضریب انتقال حرارت بین لوله‌ها و بستر مواد  $10$  برابر بیشتر از ضریب انتقال حرارت بین این لوله‌ها با گاز است. از پایین دستگاه، گاز مایع شده توسط نازل‌ها به درون بستر تزریق می‌شود. مجرای خروجی این گاز در بالای بدنه نصب شده است، در مسیر خروجی، لوله انتقال حرارت قرار داده شده تا حرارت گاز را بازیابی کند. سرباره جامد خارج شده از پایین دستگاه وارد خردکننده می‌شوند، بخشی از آن از طریق مجرای بالای بستر سیال به درون بستر برگردانده و بخش دیگر آن به

### ۳ مورد مطالعاتی در یکی از کارخانجات فولاد ایران

روش‌های گوناگون اشاره شده در این مقاله، برای کارخانه فولاد مورد نظر مورد بررسی قرار گرفت. نهایتاً از بین آن‌ها، بهره‌گیری از روش دمیدن هوا

جدول ۱: روش‌های دانه‌بندی مکانیکی سرباره

گروه تحقیق	روش دانه‌بندی	اندازه ذرات (mm)	فاز شیشه‌ای تولید شده (%)	دمای سرباره خروجی (°C)	خنک کننده	دمای خنک‌کننده در خروجی (°C)	نرخ بازیابی حرارت (%)
مروتنک	برخورد ذرات جامد	۳		۵۰۰-۹۰۰	هوا	۲۵۰	۶۵
فولاد کاواساکی	خرد کردن مکانیکی	۴۰		۵۰۰-۹۰۰	هوا و آب		۵۰
سومیتومو متال	خرد کردن مکانیکی	۲۰		۹۰۰	آب		۵۰
صنایع سنگین ایشیکاواجیما و سومیتومو متال	غلتک دوار	۱۰		۵۰۰-۹۰۰	هوا	۵۰۰	۶۰
موسسه انکیکی	دو غلتکه		۸۰	۵۰۰-۹۰۰	مایع خنک‌کننده		۴۰
صنایع سنگین میتسوبیشی و انکیکی	دمیدن هوا	۳			هوا و آب		۴۱
شش شرکت فولاد ژاپنی	دمیدن هوا		۹۵		هوا	۴۵۰-۵۰۰	۴۸
پیکرینگ	جام دوار	۲	۹۵	۲۵۰	هوا		۵۹
میزوچی	جام دوار	۲-۴			هوا		
CSIRO	دیسک دوار	هوا	۵۰		۲-۱	۶۰۰	
پوروانتو	دیسک دوار	۵/۸					
کاشیویا	سیلندر دوار	۱					
	خرد کننده چند مرحله‌ای	۴۰-۸۰		۱۰۰	هوا و آب		
	دستگاه بازیابی حرارت از بستر سرباره	۳-۰/۱					

کننده نباشد. فرآیندهای دانه‌بندی گریز از مرکز، فرآیندهای بهینه‌ای هستند، زیرا ذرات سرباره را با سایز کوچک و فاز شیشه‌ای مورد نظر فراهم می‌کنند و هوای کمی نیاز دارند. نرخ بازیابی حرارت در فرآیندهای دانه‌بندی گریز از مرکز به حدود ۶۰٪ می‌رسد.

تجهیزات مورد نیاز در فرآیندهای دمیدن هوا و بیشتر فرآیندهای خرد کردن مکانیکی پیچیده‌تر از فرآیندهای دانه‌بندی گریز از مرکز است. در جدول ۱ خلاصه‌ای برای فرآیندهای دانه‌بندی و روش‌های بازیابی حرارت ارائه شده است.

در حال حاضر از میان روش‌های مکانیکی بازیابی حرارت، روش خرد کردن مکانیکی تقریباً حذف شده است و کاربردی ندارد؛ روش دمیدن هوا نیز توسط چند کارخانه آزمایش شده و بهبود یافته است، اما روش‌های دانه‌بندی گریز از مرکز به دلیل سادگی تجهیزات، قابلیت ترکیب با دستگاه‌های مختلف بازیابی حرارت، بازده حرارتی بالاتر، تولید ذرات در سایزهای تعیین شده و با فاز شیشه‌ای کنترل شده از نظر اقتصادی مناسب‌تر هستند.

## مراجع

- [1] Zhu, Xun, Zhang, Hui, Tan, Yu, Wang, Hong, and Liao, Qiang. Analogue experimental study on centrifugal-air blast granulation for molten slag. *Applied thermal engineering*, 88:157-164, 2015.
- [2] G. Hendrik, van Oss. slag-iron and steel. *US geological survey minerals yearbook*, 2010.
- [3] Xu, Yongtong, Ding, Yi, Cai, Zhangping, Liu, Qing, and Ye, Shufeng. Development of heat recovery from blast furnace slag using dry granulation methods. *China Metall*, 17(9):1, 2007.
- [4] Tetsuro, N, Hiroshi, N, Koichi, F, and Tsukio, I. Heat recovery in dry granulation of molten blast furnace slag. *Energy Dev. Jpn.:(United States)*, 5(3), 1983.

<sup>1</sup>Ecomaister

در حالت اصلاح شده که به گونه خشک می‌باشد، با توجه به سادگی انجام و از همه مهمتر عدم استفاده از آب و مشکلات ناشی از آن در فرآیند پیشنهاد گردید. شرکت اکوماستر<sup>۱</sup> کره جنوبی دارای این تکنولوژی است و تمایل به همکاری دارد. با این روش، مشکلات زیست محیطی ناشی از سرباره، تبدیل و بازیابی سرباره به مواد قابل استفاده، رفع می‌گردد. این تکنولوژی، روشی موثر جهت مدیریت ضایعات سرباره کوره‌های قوس الکتریک و تبدیل آن‌ها به موادی ارزشمند و با کاربردهای متنوع می‌باشد. از نقطه نظر سادگی و مسائل اقتصادی، این تکنولوژی برای کارخانه فولاد مورد نظر مناسب است. از این رو لازم است برای رهایی از مشکلات ریزش مستقیم سرباره بر روی زمین و انبارش سرباره خنک شده، با ایجاد طرح و یا طرح‌های پایلوتی که بر مبنای فرایند دمیدن با هوا استوار است، این فرایند را به صورت آنلاین اجرا نمود.

## ۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش شده تا روش‌های مختلف دانه‌بندی و بازیابی حرارت سرباره مرور گردد و تأثیر عوامل مختلف بر نرخ بازیابی حرارت بررسی شود. واضح است که اندازه ذرات دانه‌شده با پیشرفت فرآیندهای صنعتی از خرد کردن مکانیکی تا دانه‌بندی گریز از مرکز کوچکتر می‌شود. ذرات کوچکتر راندمان تبادل حرارت بالاتری دارند و کیفیت سرباره خنک شده، بهتر است. نرخ بازیابی حرارت برای روش‌های مختلف در محدوده ۴۰ - ۶۵ درصد است. در بسیاری از فرآیندهای خرد کردن مکانیکی، نرخ سرمایش برای تولید سرباره با فاز شیشه‌ای کافی نیست، اما هر چه زمان دانه‌بندی طولانیتر باشد، میزان بازیابی حرارت افزایش می‌یابد. در فرآیندهای دمیدن هوا از نرخ بالای جریان هوا برای سرد کردن سریع سرباره استفاده می‌شود، تا ذرات کوچکتر با فاز شیشه‌ای بیشتری تولید شود. با این حال دمای هوای گرم‌شده کم است، این باعث می‌شود نرخ بازیابی حرارت (۵۰ - ۴۰ درصد) راضی



- [23] Pickering, SJ, Hay, N, Roylance, TF, and Thomas, GH. New process for dry granulation and heat recovery from molten blast-furnace slag. *Ironmaking and steelmaking*, 12(1):14-20, 1985.
- [24] Qu, Yu-lin, Mao, Yan-li, Zhang, Dong-li, and Wang, Zhuo. Progress on granulation for blast furnace slag by rotary cup atomizer at home and abroad. *Energy Metall Ind*, 30(4):23-25, 2011.
- [25] Mizuochi, Toshio, Akiyama, Tomohiro, Shimada, Taihei, Kasai, Eiki, and Yagi, Jun-Ichiro. Feasibility of rotary cup atomizer for slag granulation. *Isij International*, 41(12):1423-1428, 2001.
- [26] J. Liu, X. Yu, C. Dou X. Hu. Experimental study on rca of blast furnace slag. *National conference of energy and thermal engineering*, 2008.
- [27] Liu, Jun Xiang, Yu, Qing Bo, Dou, Chen Xi, and Li, Rong. Experimental study on heat transfer characteristics of apparatus for recovering the waste heat of blast furnace slag. 97:2343-2346, 2010.
- [28] Purwanto, Hadi and Akiyama, Tomohiro. Mathematical modeling of molten slag granulation using a spinning disk atomizer (sda). 2005.
- [29] Purwanto, Hadi, Mizuochi, Toshio, and Akiyama, Tomohiro. Prediction of granulated slag properties produced from spinning disk atomizer by mathematical model. *Materials transactions*, 46(6):1324-1330, 2005.
- [30] S. Jahanshani, J. G. Mathieson, P. Ridgeway. Overview of the co2 breakthrough program and linkage to iisi. *CSRP'08*, 2007.
- [31] Xie, D, Donnelley, J, Flann, R, Pan, Y, Sanetsis, S, and Washington, B. Piloting the integrated dry granulation and heat recovery process at csiro. *CSRP'08*, 21:22, 2007.
- [32] Yang, Zhi-yuan, Zhou, Yang-min, Yan, Zhao-min, and YI, Chui-jie. Experimental study of dry centrifugal granulation of molten blast slag. *Science Technology and Engineering*, 23, 2009.
- [33] Xie, D, Washington, B, Norgate, T, and Jahanshahi, S. Dry granulation of slags—turning waste into valuable cement binder. , 18(4):1088-1091, 2005.
- [34] McDONALD. Dry slag granulation device and method. *Patent No. WO2013030016A1*, 2013.
- [35] Barry, W. Slag granulation device. *patent No. WO2013029933A1*, 2013.
- [36] Kashiwaya, Yoshiaki, In-Nami, Yutaro, and Akiyama, Tomohiro. Development of a rotary cylinder atomizing method of slag for the production of amorphous slag particles. *ISIJ international*, 50(9):1245-1251, 2010.
- [37] Kashiwaya, Yoshiaki, In-Nami, Yutaro, and Akiyama, Tomohiro. Mechanism of the formation of slag particles by the rotary cylinder atomization. *ISIJ international*, 50(9):1252-1258, 2010.
- [38] Maruoka, Nobuhiro, Mizuochi, Toshio, Purwanto, Hadi, and Akiyama, Tomohiro. Feasibility study for recovering waste heat in the steelmaking industry using a chemical recuperator. *ISIJ international*, 44(2):257-262, 2004.
- [5] Sieverding, F. Heat recovery by dry granulation of blast furnace slags. *Steel Times*, 208(7):469-469, 1980.
- [6] Ind, Sumimoto Metals. Treatment of molten slags. *Japan patent*, 57:086, 1982.
- [7] H. Yoshida, Y. Nara, G. Nakatani T. Anzai H. Sato. The technology of slag heat recovery at nkk. *Technical Research Center, NKK, Japan*, 1984.
- [8] Hu, J. Development of comprehensive utilization technology of blast furnace slag at home and abroad and suggestion for angang. *Angang Technology*, 2003.
- [9] Tiberg, N. Energy recovery from molten slag and exploitation of the recovered energy. *Conference heat recovery from molten slag*, pp. 1837-1842, 2010.
- [10] Bisio, G. Energy recovery from molten slag and exploitation of the recovered energy. *Energy*, 22(5):501-509, 1997.
- [11] Barati, Mansoor, Esfahani, Shaghayegh, and Utigard, TA. Energy recovery from high temperature slags. *Energy*, 36(9):5440-5449, 2011.
- [12] et al, Fujii. Apparatus for heat recovery from molten slag. *US. patent*, 4,350,326, 1982.
- [13] Shun, L. Heat recovery from b.f. slag at home and abroad. *Ind Heating*, 38(9):5-32, 2009.
- [14] Dai, Xiao-tian, QI, Yuan-hong, and ZHANG, Chun-xia. Development of molten slag dry granulation and heat recovery in steel industry [j]. *Journal of Iron and Steel Research*, 7, 2008.
- [15] Z. Cao, L. Xie. Facility for liquid slag treatment by rotary cylinder and its production results at baosteel. *baosteel technology, Shanghai China*, 2001.
- [16] Rodd, L, Koehler, T, Walker, C, and Voermann, N. Economics of slag heat recovery from ferronickel slags. in *Sustainability for Profit. Conference of Metallurgists (COM2010)*, pp. 3-17, 2010.
- [17] Works, Fukuyama. Blast granulation system of bof slag and its products. *Nippon Kokan Technical Report*, 38, 1983.
- [18] Ando, J, Onoue, H, Nakahara, T, Ichimura, S, and Kondo, M. Development of slag blast granulating plant characterized by innovation of the slag treatment method, heat recovery and recovery of slag as resources. *Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev.*, 22(2):136-142, 1985.
- [19] for Technical, National Swedish Board. A new granulation technique for heat recovery from molten slag. *Energy technology*, 1979.
- [20] G. Li, C. Zhu. Environmental protection and energy conservation of ferrous metallurgy, 2nd ed. *Beijing, Metallurgical Industry Press*, 2010.
- [21] Youwu, Zhou. Comprehensive sensible heat recovery technologies of blast furnace slag developed in japan. *Angang Technol*, 10, 1990.
- [22] S. Wang, F. Liang, J. Wang. Technologies and utilizations of solid waste recycle [m]. *Beijing, Metallurgical Industry Press*, 2003.

- [39] Rowe, David Michael. Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source. *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, 1(1):13-23, 2006.
- [40] et al, Solvi B. Dry granulation of metallurgical slag. *Patent No. US20130206875A1*, 2013.
- [41] et al, Marc Solvi B. Granulation of metallurgical slag. *patent No. US20130292878A1*, 2013.
- [42] T, Shimizu. Device for recovering heat of molten slag. *patent No. EP2431697A1*, 2010.