مطالعات علوم محیط زیست، دوره نهم، شماره۱، فصل بهار سال ۱۴۰۳، صفحه ۷۹۹۶-۷۹۷۷

RDF پاسخی به تولید سیمان پایدار در زنجیره ارزش اقتصادی آن

حانیه عباسلو [۱*]، بهادر ابول پور[۲]، مهرداد تکلوزاده[۳]
۱*- دانشکده عمران-محیط زیست، دانشگاه صنعتی سیرجان
۲- دانشکده شیمی، دانشگاه صنعتی سیرجان
۳- دانشجوی کارشناسی، دانشکده شیمی، دانشگاه صنعتی سیرجان
ایمیل نویسنده مسئول: abaslou@gmail.com
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۱۶

چکیده

در آینده نزدیک و با گران‌تر شدن هزینه انرژی، کارخانه‌های بیشتری تمایل دارند از زباله‌ها برای تولید انرژی استفاده نمایند. هزینه‌های دفن زباله در حال افزایش است و به طور فزاینده‌ای باعث افزایش هزینه بازیافت می‌شود. از طرفی سوخت‌های جایگزین برای تولید سیمان کارآمد از نظر اقتصادی ضروری هستند. زباله‌ها، بسته‌بندی و سایر مواد می‌توانند جایگزین سوخت‌های فسیلی گران قیمت مانند زغال سنگ و نفت باشند. اما ابتدا باید آن‌ها را به سوخت با کیفیت بالا (RDF: Refuse Derived Fuel) تبدیل کرده و به طور ایمن در کارخانه‌ها نگهداری کرد. این وظیفه‌ای است شرکت‌های تولید سیمان با عضویت در ابتکار پایداری سیمان (CSI) و شورای جهانی تجارت برای توسعه پایدار (WBCSD) برای خود تعیین می‌نمایند. هدف جایگزینی منابع انرژی فسیلی گران قیمت مانند زغال سنگ، گاز و نفت در تولید و کاهش انتشار CO_2 بوده است. این مطالعه دیدگاه‌های ارزشمندی را در مورد تولید RDF به‌عنوان یک جزء پایدار از یک سیستم مدیریت یکپارچه MSW، به ویژه برای کشورهای در حال توسعه، در جهت دستیابی به اهداف ۱۷ گانه توسعه پایدار (۱۷SGDs) و اقتصاد چرخشی ارائه می‌دهد. RDF مناسب نسبت به پسماند جامد شهری، ارزش حرارتی بالاتر، رطوبت، خاکستر، کلر، کوگرد و نیتروژن کمتری دارد.

کلمات کلیدی

"سوخت مشتق دورریز"، "سیمان"، "پسماند"، "سوخت‌های فسیلی"، "پایداری"

۱- مقدمه

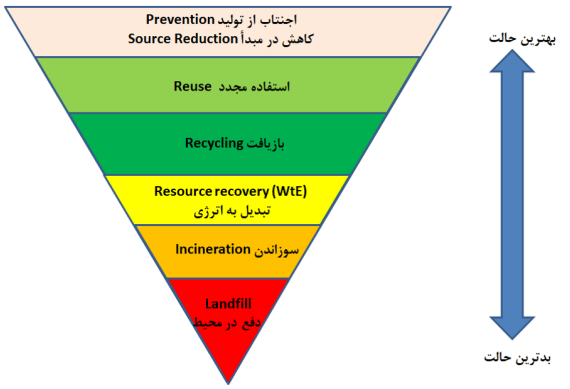
بخشی از زباله جامد شهری قابل اشتعال شامل مخلوطی از کاغذ، مقوا، پلاستیک، پارچه، چرم و چوب که فاقد بوی تعفن هستند و می‌توان از آن‌ها محصولی تولید کرد که دارای ارزش حرارتی بالا باشند، RDF نامیده می‌شود. درواقع سوخت حاصل از پسماند (RDF)، از پسماند یا زباله‌های خانگی و تجاری تولید می‌شوند که شامل مواد زیست تخریب‌پذیر و همچنین پلاستیک می‌باشند که مواد غیرقابل احتراق مانند شیشه و فلزات از آن برداشته و مواد باقیمانده خرد می‌شوند. عمده‌ترین کاربرد RDF، استفاده به‌عنوان سوخت اصلی یا مکمل در بویلرها و کوره‌ها می‌باشد (Sharma et al., ۲۰۲۲; Shehata et al., ۲۰۲۲).برخی سوخت‌های جایگزین شامل: ۱-سوخت جامد بازیافت شده (SRF: Solid Recovered Fuel) از زباله‌های خانگی، ۲-گوشت و استخوان وعده‌های غذایی (MBM: Meat and Bone Meal)، ۳- Chemfuel ساخته شده از حلال‌های صنعتی، ٤- لاستیک‌های خرد شده (TDF: Tire-derived Fuel)، ٥- سوخت‌های زیستی یا زیست توده (کفاش بازاری، ۱۳۹۹).

سوخت بازیافتی جامد (SRF) یک سوخت جایگزین باکیفیت بالا برای سوخت‌های فسیلی است که از پسماندهای تجاری عمدتا شامل کاغذ، کارت، چوب، پارچه و پلاستیک تولید میشود. SRF برای بهبود کیفیت و ارزش، پردازش‌های اضافی را پشت سر گذاشته است. این ماده از ارزش حرارتی بالاتری نسبت به RDF برخوردار است و در مکان‌هایی مانند کوره بلند سیمان استفاده می‌شود یکی از راه‌هایی که نیاز انسان به سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد، استفاده از انرژی‌های دیگر همچون انرژی‌های پاک و نیز انرژی‌های ناشی از بازیافت زباله می‌باشد. به‌کارگیری این روش‌ها، نه تنها انرژی موردنیاز را تأمین می‌کند، بلکه حامی محیط‌زیست نیز می‌باشد. بازیافت انرژی از مواد زائد، علمی است که امروزه به آن توجه ویژه‌ای می‌گردد و روش‌های مختلف از این نوع تولید انرژی در دنیا در حال آزمایش و امکان‌سنجی می‌باشد که می‌توان به روش‌های مستقیم مثل سوزاندن و روش‌های غیرمستقیم مثل کمپوست، پیرولیز، بیوگاز و سوخت حاصل از زباله اشاره کرد. سوخت حاصل از زباله (RDF) نیز روش جدید از تولید انرژی می‌باشد. این نوع سوخت هم ارزان و قابل دسترس

بوده و هم سریع‌تر به انرژی موردنیاز تبدیل می‌گردد. اولین تحقیقات در خصوص تولید RDF در امریکا در مقیاس آزمایشگاهی در سال ۱۹۷۰ آغاز گردید. از میان انواع مختلف RDF تولیدشده مشخص گردید که RDF متراکم شده، به دلیل یکنواخت و عدم وجود مواد غیرقابل احتراق نسبت به سایر RDF های تولیدی از ارزش حرارتی بالاتری برخوردار است. یکی از روش‌های تولید RDF بدین‌صورت است که مواد زائد جامد پس از عبور از خردکننده اولیه، سرند کننده، جداکننده مغناطیسی وارد تونل بادی شده، سپس وارد خردکننده ثانویه، خنک‌کننده گردیده و محصول به صورت پلیت RDF تولید می‌گردد. این محصول را می‌توان به‌صورت سوخت جایگزین یا همراه با سوخت‌های فسیلی برای تولید کلینکر، آب گرم، الکتریسیته و سایر مصارف صنعتی استفاده نمود. استفاده از RDF به عنوان یک سوخت پایدار در صنایع از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است و همچنین RDF منبع انرژی پایان‌ناپذیر با حداقل آلودگی است. با تبدیل زباله به RDF می‌توان معضلات دفع نامناسب زباله که منجر به انتشار بیماری‌های خطرناک و ایجاد مناظر ناخوشایند می‌گردد، جلوگیری نمود و به حفظ محیط‌زیست کمک کرد. این روش بازیافت انرژی که استقبال گسترده‌ای در دنیای امروز داشته و موردتوجه متخصصین بازیافت مواد و انرژی قرارگرفته است، به‌نحوی‌که تلاش‌های چشم‌گیری بر دستیابی به روش‌های تولید RDF با حداقل هزینه و تولید آلودگی در حال انجام می‌باشد. باید دقت نمود که سوزلندن زبله‌ها نیازبه کنترل دقیقی دارد. خواص آن، شرایط فیزیکی سوخت و محتوای عناصر آن مانند عناصر سمی، ترکیبات و محتوای خاکستر، مقدار رطوبت و مواد فرار موجود در آن باید قبل از مصرف، به طور کامل مورد مطالعه قرار گیرد (ابطحی محصل و همکاران، ۱۳۹۲). جهت مصرف بهینه سوخت جایگزین RDF، پارامترهای دیگر شامل ارزش حرارتی سوخت، چگالی، یکنواختی یا همگنی و نوسان عملکرد تجهیزات را باید مدنظر داشت. بهره‌وری پایین از منابع و محصولات سبب شده است که ایران رکورددار مصرف انرژی در جهان باشد. به طور مثال میزان مصرف انرژی در ایران دو برابر چین و چهار برابر هند است و به طورکلی پنج برابر متوسط جهانی می‌باشد. ازاین‌رو مدیریت مصرف انرژی به صورت یک موضوع اساسی و جدی بوده و یک نگرش بلندمدت درست می‌توانید منافع بسیاری را برای صنعت و جامعه به ارمغان بیاورد. بهره‌گیری مناسب از این راه‌کارها در صنعت سیمان می‌تواند گامی موثر در راستای صنعت تولید بتن و توسعه پایدار باشد.

۲- بحران مدیریت پسماندهای شهری

مدیریت پسماند جامد یکی از حوزه‌های فعالیت شهرداری‌ها باهدف تأمین سلامت و امنیت جامعه و نیز حفظ محیط‌زیست می‌باشد. مدیریت پسماند جامد از مجموعه فعالیت‌های مکمل با رویکرد زیست‌محیطی به‌منظور کاهش میزان تولید پسماند، بازیابی ارزش از پسماند و دفع پسماندها تشکیل‌شده است. مطلوب‌ترین و منطقی‌ترین شیوه مدیریت پسماند جامد، بازیابی ارزش پسماند از طریق تبدیل پسماند به سوخت و انرژی است. تبدیل پسماند به سوخت موجب کاهش حجم پسماند دفع‌شده و در نتیجه نیاز کمتر به محل‌های دفن پسماند، کاهش میزان عناصر با سمیت بالا در پسماند جامد و تقلیل انتشار آلاینده‌ها است.به‌عبارت‌دیگر، مدیریت مواد زائد جامد عبارت است از مجموعه مقرارت منسجم و سیستماتیک در خصوص تولید، ذخیره، جمع‌آوری، حمل‌ونقل، پردازش و دفع مواد زائد جامد که منطبق بر اصول زیست‌محیطی و بهداشت عمومی بوده و شامل روابط پیچیده میان‌بخشی بین رشته‌هایی مانند علوم سیاسی، برنامه‌ریزی شهری، اقتصاد، جغرافیا، جامعه‌شناسی، ارتباطات، آمار، بهداشت، محیط‌زیست و مهندسی عمران و...باشد؛ بنابراین کلیه موارد اداری، مالی، قانونی، طراحی و مهندسی برای حل مشکل پسماند را در برمی‌گیرد.



شکل ۱- اولویت عملکرد مدیریت پسماند(Tchobanoglous and Kreith, ۲۰۰۲)

همان‌طورکه در شکل ۱ مشاهده می شود، یکی از روش‌های مدیریت پسماند، تبدیل پسماند به انرژی است؛ که یکی از روش‌های بازیابی انرژی، تبدیل پسماند به سوخت است.امروزه یکی از مشکلات اصلی شهرها در ایران، مبحث پسماندهای شهری و دفع آن‌ها است. همواره راهکارهای مختلفی برای حل این معضل پیشنهاد شده که هرکدام دارای معایب و مزایای خاص خود می‌باشند. جنبه‌های محیط‌زیستی و اقتصادی دو فاکتور اصلی در تعیین سیستم مدیریت پسماند برای یک شهر به‌شمار می‌روند که

همواره بایستی گزینه نهایی مدیریت پسماند و روش دفع پسماندها را براساس این دو عامل سنجید و درنهایت بهترین و مناسب‌ترین را انتخاب کرد.عمده صنایع سیمان کشور در مجاورت شهرهایی با جمعیت متوسط به بالا قرارگرفته‌اند. این شهرها معمولاً در حدود ۲۰۰ الی ۶۰۰ تن پسماند تولیدی در روز دارند که مدیریت آن‌ها هزینه‌های بسیار زیادی بر شهرداری‌ها گذاشته است. در سال گذشته برای دفع هر کیلوگرم پسماند شهری در حدود ۴۱۰ ریال توسط شهرداری‌ها هزینه شد که با توجه به میزان تولید بسیار زیاد روزانه، مبلغ صرف شده سیار، قابل‌توجه است؛ ازاین‌رو هرگونه راهکاری که باعث کاهش هزینه‌های واحد خدمات شهری و حتی درآمدزایی شهرداری شود، لازم و ضروری است و می‌تواند کمک بسیاری به شهرداری باشد.در بعضی شرایط وجود یک صنعت خاص در منطقه معادلات سیستم‌های مدیریت پسماند را از حالت عادی و روتین آن به هم می‌زند و توجیه‌پذیری رابه سمت گزینه‌های دیگر سوق می‌دهد. یکی از این صنایع تعیین‌کننده، صنعت سیمان در مجاورت یک شهر است. صنعت سیمان به دلیل نوع فرایند و محصول تولیدی خود یکی از مناسب‌ترین، اقتصادی‌ترین و پاک‌ترین صنایع جانبی برای دفع پسماندهای جامد شهری است. اصولاً در تمام دنیا، شهرهایی که در مجاورتشان کارخانه سیمان وجود دارد، پسماند شهری خود را تبدیل به سوخت‌های (refuse-derived fuel) RDF یا SRF (Solid Recovered Fuels) کرده و در اختیار کوره کارخانه سیمان قرار می‌دهند. در سال‌های اخیر، سعی شده که پسماند را به شیوه‌ی صحیحی مدیریت کنند که یکی از روش‌های صحیح مدیریت پسماند، استفاده از پسماند در صنایع مختلف برای تولید انرژی است. پسماند به روش‌های مختلفی ازجمله سوخت کمکی SRF و RDF مورداستفاده قرار می‌گیرد. تفاوت زیادی بین این دو سوخت وجود ندارد تنها در شیوه پردازش و نوع استفاده در صنایع دارای تفاوت می‌باشند و اینکه SRF همونیژیره‌تر و دارای آلودگی کمتری نسبت به RDF است (شکل ۲).

RDF SRF

شکل ۲- نمونه‌ای از سوخت‌های SRF و RDF تولیدشده

محاسبات ارزش حرارتی بالا و پایین، تولید RDF و ذخیره زغالسنگ و کاهش تولید دی اکسید کربن به علت استفاده از RDF درروابط ذیل آورده شده است (Sarquah et al., ۲۰۲۳):

$$LHV = [HHV - ۲۰۶\ H] * [(۱ - ۰,۰۱MC) - ۲۳.۰]$$

MC: محتوای رطوبت

H: مقدار هیدروژن

LHV: ارزش حرارتی پایین

HHV: ارزش حرارتی بالا

RDF generation (ton/yr) = MSW (ton/yr) * Residual fraction (wt%) * RDF components(wt %)

Coal savings (ton/yr) = substitution rate * RDF quantity (ton/yr)

Cost of coal saving (USD/yr) = coal saving (ton/yr) * cost of coal (USD/ton)

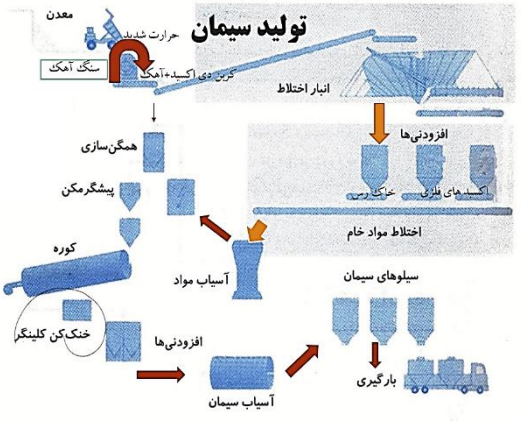
Coal combustion $CO^{۲}$ emissions saving (ton/yr) = coal saving (ton/yr) * emission factor

تقریباً، هر تن زغالسنگ ۲/۴۲ تن دی اکسید کربن تولید میکند (EIA Coal, ۲۰۲۰).

۳- ماهیت و تولید سیمان

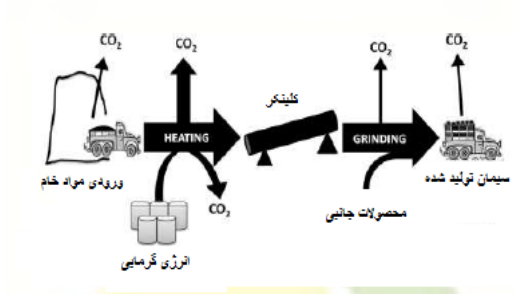
سیمان از مهم‌ترین مواد اساسی در صنعت ساختمان و مهندسی عمران است و نقش مهمی را به‌عنوان مواد ساختمانی در سرتاسر تاریخ تمدن و شهرسازی بازی کرده است. استفاده اصلی سیمان تولید بتن است. تولید سیمان بر اساس مواد طبیعی اولیه و ثانویه و مواد خام و بر اساس استانداردهای صنعتی خاص متفاوت است.سیمان پودر نرم خاکستری‌رنگی است که در ترکیب با ماسه، شن و آب منجر به تشکیل بتن می‌گردد که وسیع‌ترین ماده ساختمانی را در جهان شامل می‌شود. جزء اصلی سیمان را کلینکر شامل می‌دهد که از مواد اولیه‌ای همچون سنگ‌آهک و خاک رس به‌وجود می‌آید که بعد از خرد و همگن شدن به درون کوره‌های دوّار فرستاده می‌شوند. پختن کلینکر در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد برای شکل‌گیری ترکیبات جدید صورت می‌گیرد؛ کلینکر به‌طورکلی شامل اکسید کلسیم، سیلیسیوم، آلومینیوم و آهن است. در گام بعدی، محصول پخته‌شده آسیاب و نرم می‌گردد و سنگ گچ و مواد اضافی دیگری همچون

خاکستر زغال‌سنگ و پزولانیک‌های طبیعی به آن افزوده می‌شود که تمامی این ترکیبات در آخر منجر به تولید پودری نرم و همگن به نام سیمان می‌شوند (Sivapullaiah and Biag, ۲۰۱۱). در شکل ۳ شماتیکی از فرایند تولید سیمان آورده شده است.



شکل ۳- فرایند تولید سیمان

سیمان در منطقه بزرگ تولید می‌شود که به علت هزینه بالا حمل‌ونقل در کنار منابع مواد خام تولید و استفاده می‌شود. تعداد واحدهای تولیدی در کشورهای توسعه‌یافته در حال کاهش است درحالی‌که در کشورهای نوظهور در حال افزایش است. تولید سیمان جهانی در ۲۰۱۳ بیش از GT ٤ تخمین زده‌شده است. در کشورهای چین و هند تولید سیمان ۲ تا ۳ برابر شده درحالی‌که در آمریکا و اروپا تولید سیمان کاهش‌یافته است. به‌طوری‌که تخمین زده می‌شود، تولید سالانه سیمان جهان از ۲۵٤۰ میلیون‌تن در سال ۲۰۰٦ به چیزی در حدود ۳٦۸۰ تا ٤۳۸۰ میلیون‌تن در سال ۲۰۵۰ می‌رسد (Gregg et al., ۲۰۰۸). با توجه به آمار ارائه‌شده توسط انجمن صنفی کارفرمایان سیمان ایران، در حال حاضر ٦۸ کارخانه سیمان با ظرفیت اسمی سالانه ۷۵۷۰٦۳۰۰ کیلوگرم کلینکر و ۷۷۵۳٤۷۹۷ کیلوگرم سیمان مشغول به فعالیت است و تنها در سال ۱۳۹۱ به ازای تولید ۷۱ میلیون تن، در حدود $۱۰^{۱۲}$ × ٦۱/۷۷ کیلوکالری انرژی حرارتی در این صنعت مصرف‌شده است که خود نشان‌دهنده مصرف عظیم انرژی و مواد اولیه در این صنعت است.سوخت اولیه در تولید سیمان به‌صورت رایج زغال‌سنگ است و از پتکک و روغن سنگین و گاز طبیعی استفاده می‌شود. تخمین زده‌شده که صنعت جهانی سیمان در حدود ۵٪ نشر CO_2 انسانی را دارد. انتشار CO_2 نقش اساسی در گرمای جهانی دارد. دانش تولید سیمان در طی چند دهه در حال پیشرفت است. در پروسه صنعتی تولید کلینکر باعث ایجاد بیشترین مقدار CO_2، گردوغبار و اجزای معدنی فرار می‌شود. در یک کارخانه سیمان مدرن، ٦۰٪ CO_2 منتشرشده به‌وسیله کارخانه سیمان از کلسینه‌شدن سنگ‌آهک، ۳۰٪ از احتراق سوخت‌ها در کوره و ۱۰٪ درصد نیز به دیگر اقدامات پایین‌دست کارخانه (مسائل حمل‌ونقل و مصرف الکتریسیته مربوط است) منتج می‌شود (Bosoaga et al., ۲۰۰۹). در شکل ٤- ترسیم ساده تولید سیمان و منابع انتشار دی اکسید کربن آورده شده است.



شکل ٤- ترسیم ساده‌ای از فرآیند تولید سیمان و منابع انتشار گاز CO_2 و اهمیت نسبی آن‌ها (Habert et al., ۲۰۱۰)

به علت مصرف انرژی زیاد در صنعت سیمان، صنعت سیمان برای سالیان متمادی موضوع تحقیق و بررسی به‌منظور استفاده از مواد خام و سوخت‌های جایگزین برای کمک به کاهش مصرف منابع طبیعی بدون تأثیر بر کیفیت سیمان یا افزایش تأثیرات زیست‌محیطی قرارگرفته است. بهره جستن از این سوخت در صنعت سیمان ایران نسبت به روش‌هایی همچون پیرولیز، زباله‌سوز و گازی‌سازی پسماند این مزیت را دارد که اولاً درحال‌حاضر زیرساخت‌های لازم به‌منظور تولید و استفاده از این سوخت در دسترس است و ثانیاً با توجه به تعداد و پراکندگی مناسب کارخانه‌های سیمان که معمولاً در اطراف شهرها واقع‌شده‌اند، هزینه حمل‌ونقل کمتری برای جابجایی آن باید صرف شود.در صنعت سیمان پایداری یک مفهوم پیچیده است. پایداری به بهبود کارایی منابع قابل‌استفاده، کاهش انتشار و حفاظت از سلامتی و امنیت کارگرها و اجتماع محلی و حفاظت از آب، مراقبت از خواص زمین و افزودن سودبخشی کمک می‌کند. تولید سیمان وابسته به جنبه‌های اقتصادی و تکنولوژیکال و محیط‌زیستی و صنعت است. استفاده مواد سیمانی مکمل در تولید سیمان یا مخلوط بچینگ بتن یک عملکرد پایداری برای کاهش نشر فراهم می‌کند (تولید سیمان با پسماند، سرباره کوره آهن، سیلیکا فوم یا خاکستر بایموس).به‌منظور کاهش CO_2 جابجایی زغال‌سنگ و پتکک با گاز طبیعی، استفاده از سوخت‌های دیگر مثل تایر، پسماند روغن و مایع حلال، پسماند خانگی: پلاستیک، پارچه، کاغذ، منابع انرژی بایومس، مواد غذایی حیوان و چوب، پسماند خاکاره و لجن

فاضلاب در صنعت سیمان اروپا استفاده می‌شود. در جدول ۱ مقدار انتشار گاز CO_2 به ازای گیگا ژول مصرفی برخی از سوخت‌های رایج در این صنعت ارائه‌شده است. اگرچه کاهش انتشار CO_2 مربوط به فرآیند تکلیس بسیار سخت است، اما می‌توان با جایگزینی برخی از مواد به‌جای سنگ‌آهک یا خاک‌رس، به این مهم دست‌یافت. بااین‌حال کاهش انتشار گاز CO_2 در فرآیند احتراق با استفاده از روش‌های مختلف (مانند افزایش کارآمدی فرآیندها یا استفاده از سوخت‌های جایگزین) بیشتر امکان‌پذیر است.

جدول ۱- مقدار گاز CO_2 منتشرشده به ازای واحد انرژی تولیدشده از برخی سوخت‌های رایج (Marland et al., ۲۰۰۴)

ردیف	نوع سوخت	Kt CO_2 /GJ fuel
۱	کک نفتی	۹۷/۵
۲	زغال	۹۴/۶
۳	نفت	۷۷/۴
٤	گاز طبیعی	۵۶/۱

برخی از پسماندهای حاصل از فعالیت انسان این پتانسیل را دارند که هم در فرآیند تولید انرژی به کار رفته و هم از خاکستر حاصل، به‌عنوان ماده اولیه برای تولید کلینکر استفاده کرد؛ بنابراین یکی از بهترین روش‌ها برای جلوگیری از اتلاف پسماندها با هدف استفاده مجدد، کاربرد آن‌ها به‌عنوان سوخت جایگزین در کوره‌های سیمان است. در این روش علاوه بر کاهش مصرف سوخت و مصالح طبیعی، افزایش طول عمر منابع و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مشکلات ناشی از دفع این پسماندها را نیز تا حد زیادی کاهش می‌دهد؛ بنابراین صنعت سیمان پتانسیل زیادی برای ایجاد بستری مناسب در جهت صرفه‌جویی مصرف انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و استفاده مجدد از پسماندها است. بر همین اساس امروزه مهندسین، مشاوران و سیاست‌گذاران بر روی استفاده از منابع متنوع انرژی در صنعت سیمان متمرکز شده‌اند.

٤- سوخت‌های جایگزین

بهره‌برداری از سوخت جایگزین در صنعت سیمان از دهه ۱۹۸۰ شروع شد. سوخت جایگزین در خط‌های کلسینر استفاده می‌شود و تقریباً تا ۱۰۰% در مرحله پیش‌کلسینر به‌سرعت استفاده می‌شود. سوخت‌های جایگزین به‌طوراساسی از پسماند حیوانات، لجن فاضلاب (SS) و روغن پسماند که در جدول ۲-۳ دیده می‌شود، به‌دست می‌آید، اخیراً، سوخت‌های بازیافتی جامد از جریان پسماندهای صنعتی گرفته‌شده و در حال رشد به سمت استفاده از پسماندهای شهری می‌باشند. این سوخت‌های گرفته‌شده پسماندی، به‌وسیله پرتوهای نور پیش‌تصفیه شده‌اند و به‌وسیله جداسازی هوا یا جداسازی مکانیکی، پردازش می‌شوند.

سوخت‌های گرفته‌شده پسماندی، شامل: کاغذ پاره‌پاره شده، پلاستیک‌ها، فویل‌ها، پارچه‌ها و لاستیک‌ها و همچنین شامل ناخالصی‌های معدنی و فلزی است. استفاده از سوخت جایگزین در کوره‌های سیمان هنوز در حال پیشرفت است. درحالی‌که در بعضی از کوره‌ها میزان جایگزینی به ۱۰۰٪ رسیده است، بازارهای پسماند محلی و شرایط مجاز، میزان استفاده بیشتر، از سوخت‌های جایگزین و مواد خام را اجازه نمی‌دهند.سوخت‌های جایگزین و مواد خام AFRM[۱] به سازگاری پروسه‌های احتراق بستگی دارد. سوزاننده و گرم‌کن مدرن چند کلنلله برای استفاده از سوخت‌های جایگزین طراحی‌شده‌اند و سیستم‌های گرماسنج، اجازه کنترل شکل شعله، برای بهره‌برداری سوختی رفتار سوخت‌ها و شرایط سوختن، برای کلینکر را می‌دهند.کوره‌های سیمان از منابع مختلف انرژی، برای تولید حرارت‌های بالای موردنیاز، برای ساخت کلینکر استفاده می‌کنند. مشهورترین منابع سوخت برای صنعت سیمان شامل: زغال‌سنگ، روغن سوخت، زغال‌سنگ کک و گاز طبیعی است (Bosoaga et al., ۲۰۰۹).AF[۲] (سوخت جایگزین) یکی دیگر از منابع انرژی استفاده‌شده توسط تولیدکنندگان سیمان، در سرتاسر جهان است. این سوخت‌ها معمولاً از ترکیب پسماندهای خطرناک، پسماندهای شهری و صنعتی به دست می‌آیند (Mokrzycki and Uliasz-Bocheńczyk, ۲۰۰۳).

سوخت‌های جایگزین استفاده‌شده در صنعت سیمان، می‌تواند جامد یا مایع باشد، درواقع وابسته به نوع اجزا و محتوی ارگانیک، یک محتوی شیمیایی مناسب موردنیاز هست.پنج گروه از سوخت‌های جایگزین جامد در ادامه معرفی‌شده است. این سوخت‌ها به‌طورکلی شامل موارد زیر می‌باشند:تفاله باقیمانده بیومس کشاورزی، باقیمانده بیومس غیر کشاورزی، پسماندهای با اساس پترولیوم، پسماندهای متفرقه، پسماندهای خطرناک و شیمیایی.قسمت اصلی تولید CO_2، از مصرف سوخت و ساختار کوره کلینکر و کلسینیشن اتفاق می‌افتد. استفاده از محتوی سوخت کم‌کربن با نسبت بالا هیدروژن به کربن،

[۱] Alternative Fuels and Raw Materials

[۲] Alternative Fuel

به‌جای سوخت‌های فسیلی رایج، به‌طور فراوان، نسبت انتشار CO_2 در پروسه تولید را، کاهش می‌دهد و همچنین، نشان داده‌شده است که استفاده از سوخت‌های جایگزین، عمر مقاوم و همچنین فشار قطره در برج پیش‌گرمایش را کاهش می‌دهد (Käänte et al., ۲۰۰٤).انواع مختلف سوخت‌های جایگزین در کارخانه سیمان، مورداستفاده قرار می‌گیرند که تجهیزات مناسب برای بهره‌برداری نصب می‌شود. همچنین استفاده از سوخت‌های جایگزین در کارخانه سیمان، باعث کاهش انتشار در لندفیل‌ها می‌شود؛ بنابراین تخمین زده‌شده‌است که بهره‌برداری از این نوع سوخت به میزان ۱٪ هرسال در سطح جهان افزایش خواهد یافت (Käänteе et al., ۲۰۰٤). جدول ۲ سوخت‌های مشتق شده از پسماندهای مختلف را، بر اساس فاز آن‌ها، نشان می‌دهد (جامد، مایع، گاز).

جدول ۲- سوخت‌های مشتق شده از پسماندهای مختلف، بر اساس فاز(Karstensen, ۲۰۰۷)

پسماندهای گازی	سوخت پسماند جامد	سوخت پسماند مایع
گاز محل‌های دفن	پلاستیک‌های صنعتی	لجن فاضلاب
گاز پیرولیز	زائدات پلاستیکی	آسفالت پودر شده
فلرینگ	پسماند غذایی	پسماندهای رنگ رزی
	زائدات لاستیک	کک‌های نفتی
	پلاستیک RDF	پسماند نفتی
	کاغذ و مقوای خردشده	پسماندهای پتروشیمی
	سوخت‌های SRF	گل حفاری

جدول ۳- ارزش حرارتی سوخت‌های مختلف استفاده‌شده در صنعت سیمان را نشان می‌دهد (Conesa et al., ۲۰۰۸).

جدول ۳- ارزش حرارتی سوخت‌های مختلف استفاده‌شده در صنعت سیمان

پسماند	انرژی (Mj/kg)
تایر مستعمل	۲۳/۰۳
برگ و گوست درختان (Husk)	۱۹/۹۳
پلاستیک‌های صنعتی	۱۸/۲۱
پسماند نفتی	۱٤/٦٥
کاغذ و مقوای خردشده	۱٤/۲۳
پسماندهای آلوده به مواد صنعتی و شیمیایی	۱٤/۲۳
پلاستیک‌های RDF	۱۱/۷۲
لجن فاضلاب	۸/۳۷

مزایای استفاده از سوخت‌های کمکی

مزیت‌های اصلی استفاده از سوخت‌های کمکی SRF در صنعت سیمان شامل موارد زیر خواهد بود:

۱. صرفه‌جویی در سوخت کوره‌های صنعت سیمان (خصوصاً مازوت)
۲. افزایش توان صادرات (کاهش مصرف داخلی)
۳. کاهش هزینه‌های انتقال و سوخت‌رسانی به صنایع سیمان
٤. کاهش وابستگی صنعت سیمان به سوخت مایع
٥. کاهش قیمت تمام‌شده سیمان
٦. تأمین قسمت اندکی از مواد اولیه سیمان و کاهش انرژی مصرفی در قسمت تهیه مواد
۷. کاهش هزینه‌های مدیریت پسماند شهرداری‌ها
۸. کاهش آلودگی‌های تولیدشده توسط واحد خدمت شهری شهرداری‌ها،
۹. کاهش آلودگی صنعت سیمان
۱۰. کاهش دی‌اکسید کربن (Clean Development Mechanism)
۱۱. امکان دفع پسماندهای ویژه و صنعتی
۱۲. بهبود کیفیت سیمان
۱۳. اشتغال‌زایی
۱٤. توسعه اقتصاد مقاومتی
۱٥. توسعه اکولوژی صنعتی
۱٦. توسعه پایدار

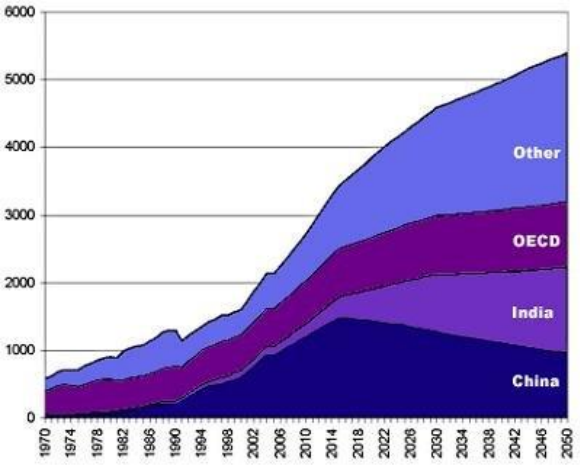
٥- تاریخچه استفاده از سوخت‌های کمکی در صنایع سیمان

استفاده از سوخت‌های کمکی SRF به‌عنوان خودسوز در کوره‌های صنعت سیمان در دهه ۱۹۷۰ میلادی شروع شد و تاکنون در بسیاری از واحدهای صنعتی سیمان به‌صورت ثابت به‌عنوان سوخت کمکی در کنار موارد اولیه ورودی به کوره مورداستفاده قرارگرفته است. کشورهایی که این تکنولوژی را به‌صورت کامل در بیشتر صنایع سیمان خود مورداستفاده قرار می‌دهند شمال آلمان، چین، ترکیه، سوئد، سوئیس، کشورهای اسکاندیناوی، بلژیک و اتریش است.در سوخت‌های SRF، مواد قابل بازیافت و غیرقابل‌احتراق مانند فلزات از پسماند جامد تفکیک‌شده سپس مواد باقی‌مانده تحت فرآیندهای مکانیکی و بیولوژیکی قرارگرفته، خردشده و درنهایت برای افزایش ارزش حرارتی- به‌وسیله خشک‌کننده- خشک می‌شوند. سوختی که از این طریق از مواد زائد جامد شهری ساخته می‌شود می‌تواند به شکل تکه‌تکه یا پودر نرم شده و یا به شکل گلوله یا مکعب‌های

متراکم شده تولید شود. طبق آنالیز فیزیکی پسماند شهری متعارف کشور ایران، حدود ۵۵ الی ٦۵ درصد پسماندهای جامد شهری می‌توانند به SRF تبدیل شود که ارزش حرارتی حدود ٦۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ BTU/pound خواهد داشت؛ بنابراین، SRF به همراه سوخت‌های فسیلی، منبع مناسبی برای تولید و تأمین انرژی حرارتی در صنعت سیمان است.

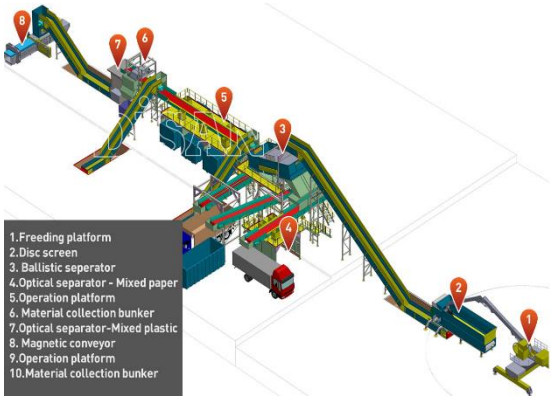
بررسی نیاز کارخانه‌های سیمان به سوخت‌های کمکی

سهم انرژی در قیمت تمام‌شده صنعت سیمان، بسته به روش تولید و سن کارخانه، حدود ۳۰٪ الی ٤۰٪ است. فرایند تولید سیمان نیازمند انرژی زیادی است و ازاین‌جهت علاقه وافری به یافتن سوخت‌های جایگزین و ارزان در بین تولیدکنندگان این ماده وجود دارد. با توجه به وابستگی کوره سیمان به نوع سوخت و نیز گازهای متصاعد شده از سوخت‌های مختلف که کنترل آن نقش مؤثری در ثبات کوره دارد و همچنین محل شارژ سوخت و نوع فرآیند پخت سیمان میزان جایگزینی SRF در هر یک از کارخانه‌های سیمان متفاوت خواهد بود.



شکل ٥- افزایش نیاز به تولید سیمان و روند افزایشی توسعه آن بر اساس مناطق مختلف دنیا (Tam et al., ۲۰۰٦)

استفاده از سوخت RDF در صنعت سیمان به دلیل شرایط ویژه کوره سیمان مناسب است. دمای بالای کوره همچنین طول و وسعت قابل‌توجه کوره که سطح تبادل انرژی را بین مشعل و زباله و نیز زباله و کلینکر به حداکثر می‌رساند موجب احتراق کامل سوخت شده و مشکل بیماری‌زا بودن پسماند را نیز حل می‌کند. علاوه بر این درجه حرارت بالا، سرعت‌بالای جریان گاز در کوره سیمان و ذخیره‌سازی طولانی‌مدت ذرات خاکستر موجب کاهش تشکیل آلاینده‌های زیست‌محیطی است. استفاده از RDF در کوره سیمان به‌جای زباله‌سوز علاوه بر تولید کمتر دی‌اکسید کربن، SO_x و NO_x به علت استفاده کمتر از سوخت‌های فسیلی همچنین موجب کاهش تولید آلاینده‌هایی از قبیل دی‌اکسین‌ها و فوران‌ها به علت دمای بالای کوره سیمان می باشد؛ بنابراین استفاده از سوخت‌های جایگزین برای محیط‌زیست در حد استاندارد قابل‌قبول است.برای تولید سوخت RDF پسماند شهری جمع‌آوری‌شده، پسماندهای شهرک‌های صنعتی و سایر پسماندها از مراکز دریافت دورریز به مرکز استفاده مجدد پسماند منتقل‌شده و پس از تفکیک تحت تأسیسات بازیابی مواد به RDF تبدیل می‌شود، درنهایت پسماند باقی‌مانده به محل‌های دفن انتقال می‌یابند.



شکل ٦- نمونه واحد تولید RDF

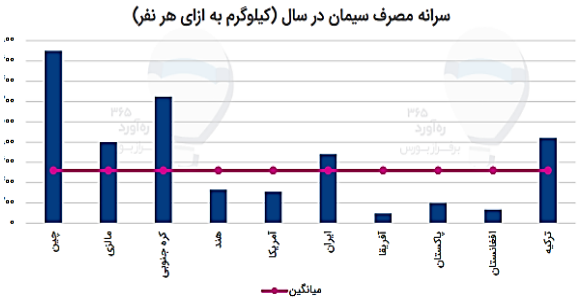
شکل ۷- نقش کوره صنعت سیمان در مدیریت پسماند

ایران به‌عنوان چهارمین تولیدکننده دنیا، حدود ۲ درصد از سهم جهانی تولید سیمان را به خود اختصاص داده است. در زیر اطلاعات صنعت سیمان به‌صورت کلی ارائه‌شده است:

- ✓ تعداد کارخانه‌های فعال: ٦۸
- ✓ تعداد کوره‌های فعال: ۹۳
- ✓ ظرفیت اسمی بر اساس تولید کلینکر: ۷۵/۷ میلیون تن
- ✓ تولید سیمان در سال ۱۳۹۲: ۷۱ میلیون تن

- ✓ مصرف داخلی سیمان در سال ۱۳۹۲: ۵۵/۶ میلیون تن
- ✓ مصرف سرانه سیمان: ۷۲۷ کیلوگرم

ظرفیت درحال‌توسعه: حدود ۱۳ میلیون تن



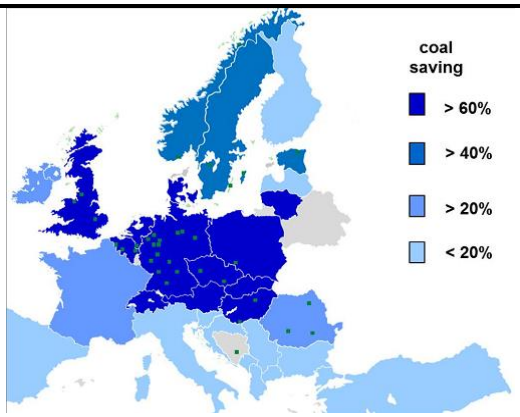
شکل ۸- سرانه مصرف سیمان در کشورهای مختلف (بررسی صنعت سیمان، ره آورد ۳۶۵)

جدول ٤- مقایسه متوسط سهم اقلام عمده بهای تمام‌شده یک‌تن سیمان تولیدی(بنیاد صنعت سیمان، ۱۳۸۵)

	متوسط کشور (میلیارد ریال)	متوسط جهانی (میلیارد ریال)
انرژی	۲۷	۲۹
مواد اولیه	۱۰	۲۷
نیروی کار	۲۳	۳۲
استهلاک	۱٦	سایر (استهلاک، تعمیرات و...)۱۲
سایر(تعمیرات، قطعات و ...)	۲٤	
متوسط بهای تمام شده تولید	۱۸-۲۰ دلار	٤۰-٤۵ دلار

آمار جدول ٤ نشان‌دهنده میزان اهمیت صنعت سیمان در توسعه صنعت و درآمدزایی و همچنین میزان سرمایه خرج شده در کشور است. ازآنجاکه انرژی به‌عنوان یکی از عمده‌ترین قسمت‌های هزینه صنایع سیمان که در حدود ۳۰ درصد کل هزینه تمام‌شده محصول را به خود اختصاص می‌دهد، از اهمیت زیادی برخوردار است.کارخانه سیمان، یکی از پرمصرف‌ترین صنایع انرژی‌بر در کشور به‌شمار می‌رود. طبق آمار و اطلاعات این صنعت، به‌صورت متوسط در کوره‌های متعارف ساعتی ۳٦ مترمکعب سوخت مازوت یا معادل ٤۱ مترمکعب گاز طبیعی سوزانده می‌شود که هزینه تأمین این انرژی بسیار بالا بوده و درنتیجه این صنایع با هرگونه سیستم صرفه‌جویی و کاهش مصرف سوخت بسیار موافق بوده و از آن استقبال می‌کند.با توجه به پیش‌بینی پتانسیل ۱۰ الی ۲۰ درصد کاهش مصرف سوخت با استفاده از سوخت‌های کمکی SRF در این صنعت، توسعه واحدهای تولید و تزریق سوخت SRF به صنعت سیمان بسیار لازم و ضروری است. طبق آخرین آمارهای رسمی سال ۲۰۱٦، مصرف انرژی صنایع سیمان در جهان در حدود ۲ درصد کل انرژی مصرفی و همچنین ۵ درصد کل مصرف انرژی بخش صنعت را به خود اختصاص داده است.عمده صنایع سیمان کشور در مجاورت شهرهایی با جمعیت متوسط به بالا قرارگرفته‌اند. این شهرها معمولاً در حدود ۲۰۰ الی ٦۰۰ تن پسماند تولیدی در روز دارند که مدیریت آن‌ها هزینه‌های بسیار زیادی بر شهرداری‌ها گذاشته است. در سال گذشته برای دفع هر کیلوگرم پسماند شهری در حدود ٤۱۰ ریال توسط شهرداری‌ها هزینه شد که با توجه به میزان تولید بسیار زیاد روزانه، مبلغ صرف شده بسیار قابل‌توجه است. ازاین‌رو هرگونه راهکاری که باعث کاهش هزینه‌ها واحد خدمات شهری و حتی درآمدزایی شهرداری شود، لازم و ضروری است و می‌تواند کمک بسیاری به شهرداری باشد.فرایند سوزاندن پسماندهای شهری در کوره صنعت سیمان با توجه به سیستم فیلترینگ بسیار قوی هوای خروجی این صنعت باعث بهبود کلی محیط‌زیست، بهبود آلاینده‌های تولیدی در کوره سیمان و کاهش اثرات مخرب محیط‌زیستی پسماندهای شهری در مقایسه با دفن در لندفیل می‌شود. این موضوع در بسیاری از مطالعات اخیر در دنیا اثبات‌شده است.هم‌زمان با افزایش جمعیت شهرها و صنعتی‌شدن، تولید انواع زباله نیز به شکل فزاینده افزایش‌یافته است. این افزایش پسماند دولتمردان را بران داشته تا دنبال راهکارهای علمی و عملی برای کاهش میزان زباله باشند. درحال‌حاضر بیش از ۳۵ کشور جهان تکنولوژی تولید انرژی از زباله مورد استفاده قرارگرفته است. به‌طوری‌که در حدود ۷۸۰ نیروگاه WTE[1] سالیانه حدود ۱٤۰ میلیون تن زباله به سوخت تبدیل می‌شود.انواع پسماندهای مورداستفاده به‌عنوان سوخت جایگزین برای صنعت سیمان شامل رنگ‌های روغنی، مایع حلال، صنایع چوب، فراورده‌های جانبی شیمیایی نظیر داروها و تولیدات شیمیایی، پسماندهای روغنی، تایرهای مستعمل، پسماندهای جامد شهری، پسماند الوار و لجن فاضلاب است. تجزیه گرمایی بعضی از پسملندهای موجود در بسیاری از موقعیت‌ها ازنقطه‌نظر علمی تابه امروز مطالعه نشده است.

[1] Waste to Energy



شکل ۹- میزان صرفه‌جویی به وجود آمده در کشورهای اروپایی حاصل از جایگزینی سوخت (Mokrzycki et al., ۲۰۰۳)

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، میزان صرفه‌جویی به‌وجود آمده در کشورهای اروپایی حاصل از جایگزینی سوخت پسماند در سال ۲۰۰۸ توانسته است بین ۲۰ الی ۶۰ درصد در مصرف زغال‌سنگ در صنعت سیمان بکاهد که این مقدار بسیار قابل‌توجه بوده و توسعه این سوخت کمکی را روزبه‌روز با اهمیت‌تر می‌کند.صنعت سیمان اروپا در ۲۰ سال گذشته، روش‌های مختلفی را برای بهبود عملکرد زیست‌محیطی و کاهش لنتشار کربن اعمال کرده است:انتشار گاز CO_2 از ۷۱۹ کیلوگرم به ازای هر تن تولید سیمان در سال ۱۹۹۰ به ۶۶۰ کیلوگرم در سال ۲۰۱۰ کاهش یافت و در سال‌های (۱۹۹۵ -۲۰۱۰) ۲۰٪ Sox، ۳۰٪ NO_x و انتشار گردوخاک با استفاده از نواری‌های تکنولوژیکال پروسه تولید که با مدرنیزه کردن واحدهای تولید، بهره‌برداری سوخت‌های متعاقب، تعویض مواد خام و کاهش فاکتور کلینکر سیمان، میسر می‌شود، کاهش یافته است. (Boyer and Ponssard, ۲۰۱۳; Supino et al., ۲۰۱۶)در طی دهه اخیر در ایتالیا، استفاده از گاز طبیعی در حدود ۶۹٪ کاهش داشته است و همچنین، سوخت سنگین به میزان ۶۰٪ در مصرف سالیانه صرفه‌جویی داشته است. عمده این صرفه‌جویی‌ها با جایگزینی بیش از ۱۱٪ از انرژی گرمایی ناشی از سوخت‌های جایگزین و ۶/۵٪ سوخت‌های میکس به‌دست‌آمده است، این صرفه‌جویی باعث جلوگیری از نشر بیش از ۲۴۱ میلیون تن از CO_2 نیز شده است. این میزان صرفه‌جویی انرژی در کشورهای اروپایی مانند هلند ۸۰ ٪ و آلمان ۶۱٪ و همچنین به‌طور متوسط در اروپا ۳۰٪ صرفه‌جویی سوخت را به‌دنبال داشته است (Supino et al., ۲۰۱۶).و از سال ۲۰۰۲ به بعد سوخت‌های مشتق شده از پسماندهای شهری توانسته‌اند درصد قابل قبولی را به خود اختصاص بدهند.در سال ۲۰۱۳، آلمان بزرگ‌ترین تولیدکننده سیمان در اروپا است. کشور آلمان در دوره زمانی ۲۰۰۸-۱۹۸۷ با استفاده از جایگزینی سوخت‌های کمکی مانند SRF معادل ۲۰٪ مصرف انرژی و ۲/۸ گیگا تن انتشار CO_2 کاهش یافته است و مصرف انرژی الکتریکی از ۱۱۰ kw/t در سال ۱۹۸۷ به kw/t (۱۰۲-۱۰۰) به ازای هر تن سیمان تولیدی در سال ۲۰۰۵ کاهش یافته است. اخیراً صنعت سیمان آلمان با مدرنیزه کردن کوره‌های خود، میزان انتشار CO_2 ۲/۹ ٪کاهش یافته است و امکان مصرف سوخت‌های جایگزین در حدود (۳۸٪-۶۱٪) افزایش یافته است (Supino et al., ۲۰۱۶).

جدول ۵- مقایسه ارزش حرارتی سوخت‌های مختلف (هراتی و همکاران، ۱۳۸۶)

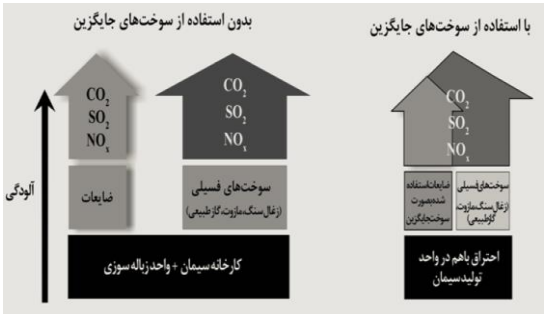
نوع سوخت	واحد	ارزش حرارتی	درصد رطوبت	درصد خاکستر
RDF	(kcal/kg)	۳۵۰۰-۳۰۰۰	۲۵-۱۵	۲۲-۲۰
TDF	(kcal/kg)	۸۵۰۰-۷۵۰۰	۱۰-۵	۵
MSW	(kcal/kg)	۳۰۰۰-۲۵۰۰	۴۰-۳۰	۳۵-۲۵
زغال سنگ	(kcal/kg)	۷۵۰۰-۶۵۰۰	۷-۳	۱۲-۷
گاز طبیعی	($kcal/m^3$)	۸۶۰۰-۸۲۰۰	بسیار ناچیز	بسیار ناچیز
مازوت	(kcal/L)	۹۷۹۰	۰/۵	۰/۴
گازوئیل	(kcal/L)	۹۲۳۲	۰/۳	۰/۰۱

طبق آخرین آمارهای رسمی اتریش، میزان انرژی حرارتی مصرف‌شده در صنعت سیمان در حدود ۳۷۴۹ مگا ژول به ازای هر تن تولید کلینکر در سال ۲۰۱۳ است. مهم‌ترین مصارف انرژی عبارت‌اند از (Sarc et al., ۲۰۱۴):

- لیگنیت و زغال‌سنگ با ارزش حرارتی: ۲۹۴۰۰ MJ/t
- کک نفتی، با ارزش حرارتی: ۳۰۷۶۰MJ/t
- روغن حرارتی، با ارزش حرارتی: ۴۱۷۰۰MJ/t

همچنین، میزان استفاده از سوخت‌های کمکی SRF در این سال به‌منظور تأمین بخشی از این انرژی شامل موارد زیر است (Sarc et al., ۲۰۱۴):

تیکه تایر با ارزش حرارتی: MJ/t ۲۸۶۳۰
چربی و استخوان حیوان با ارزش حرارتی: MJ/t ۲۲۴۸۰
روغن پسماند با ارزش حرارتی: MJ/t ۳۴۷۶۰
SRF (سوخت اصلی) با ارزش حرارتی MJ/t۱۹۱۶۰ (متوسط ۱۸۰۰۰ -۲۳۰۰۰)به‌صورت میانگین در اروپا بیش از ۹۶۳۰۰۰۰ تن در سال سوخت‌های کمکی SRF در صنایع سیمان مصرف می‌شود که این مقدار توانسته جایگزین ۳۷ درصدی سوخت‌های فسیلی در سال ۲۰۱۲ شود. نرخ جایگزینی سوخت‌های کمکی و میکس به‌جای سوخت‌های فسیلی در اتریش در حدود ۷۲ درصد در سال ۲۰۱۳ بوده است (Ozkan and Banar, ۲۰۱۰).



شکل ۱۰- دلیل جایگزینی سوخت کمکی و صنعت سیمان به‌جای زباله سوزهای شهری

تنها تجربه سوخت‌های کمکی در ایران مربوط به یک آزمایش در سیمان آبیک استان قزوین است که تنها از لاستیک‌های مستعمل استفاده شد. در این آزمایش، گازهای خروجی دودکش کارخانه توسط آزمایشگاه سازمان محیط‌زیست کنترل‌شده که نتایج آن در ادامه ارائه‌شده است. نتایج نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه آلاینده‌های محیط زیستی و آلودگی هوا است. متأسفانه، این موضوع دیگر در ایران پیگیری نشد و تاکنون مسکوت مانده است. نتایج این گزارش تاکنون چاپ‌نشده است و لذا، اطلاعات دقیق آن در دسترس نیست و تنها اطلاعات کلی و نتیجه نهایی طی مصاحبه‌ای از مدیران و کارشناسان کارخانه سیمان آبیک جمع‌آوری و ارائه‌شده است.

جدول ٦- میزان تغییر آلاینده‌های محیط زیستی ناشی از استفاده تایرهای مستعمل در کوره سیمان

آلاینده ها	سوخت های مرسوم (زغال سنگ و کک)(mg/m^3)	سوخت های مرسوم با ۰/۱۵ تایر فرسوده (mg/m^3)	درصد تغییر
گرد و غبار	٦۰	٦۰	بدون تغییر
NOx	۱۱۸۰	۸۰۰	-۳۲
SO_2	۵۰۰	۵۰۰	بدون تغییر
Co	۹۸۵	۹٤۸	-٤
ترکیبات آلی فرار	۱۲۹	٦۸	-٤۷
دی اکسین ها	۰/۱۲	۰/۰۳	-۷۵
فوران ها	۱/۱۳	۱	-۱۲

جدول ۷- ارزش حرارتی مواد اضافه شده به SRF

سوخت جایگزین	ارزش حرارتی تقریب
جامد	
خرده های پلاستیکی	٤٦۰۰۰-٤۰۰۰۰۰
مواد مصنوعی	٤٦۰۰۰
تایرهای فرسوده	۲۹۲۰۰
لاستیک های فرسوده	۳۰۰۰۰۰
ضایعات چوبی	۱۸۰۰۰
کاغذ و مقوا	۱۵۰۰۰
خاک اره و تراشه ها	۱٤۰۰۰
زباله های خانگی	۱٤۰۰۰
تفاله های نیشکر	۱۱۵۰۰
پوست درخت	۱۱۰۰۰
مایع	
ضایعات روغنی	٤۱۸۷۰
حلال های کار کرده	۳۰۰۰۰۰
رنگ و رزین	۱۸۵۰۰
روان کننده های غیر قابل استفاده	۲۷۰۰۰
چرب کننده سیاه	۱۰۲۳۰
ضایعات کارخانه رنگ	۱۹۰۰۰
گاز	
بیوگاز	۲۰۰۰۰-۱٦۰۰۰

یکی از موفق‌ترین موارد بازکنی محل دفن استفاده پسماندهای آن در تولید SRF در ایالت پنسیلوانیا در آمریکا (سال ۱۹۹۰) اتفاق افتاد. در طی مهروموم‌ها ۱۹۹۱ الی ۱۹۹۳ حدود ۲۱۹٤۷ مترمکعب پسماند دفن شده و ٦٤۵ تن مواد در هفته برای سوزاندن تهیه شد. در یک نتیجه‌گیری ۵٦ درصد از پسملندهابه‌منظور تولید SRF مصرف شد. ٤۱ درصد خاک توسط سرند بازیابی شد و تنها ۳ درصد از پسملند غیرقابل استفاده‌باقی ملند. ارزش

حرارتی هر کیلوگرم از این پسماند Btu ۳ اندازه‌گیری شد که برای رسیدن به عدد Btu ۵ در هر کیلوگرم SRF مقرر شد چهار قسمت پسماند تازه با یک قسمت پسماند بازکنی شده مخلوط شود.

شکل ۱۱- بازکنی محل دفن جهت افزودن پسماند قدیمی به SRF

در این پروژه، ۵۶٪ از پسماندها به‌منظور سوزاندن بازکنی شد و ۴۱٪ خاک توسط سرند استوانه‌ای بازیافت گردید و ۳٪باقی‌ملنده غیرقلبل سوزلندن وبازیافت بود که مجدداً دفن شد در سال ۱۹۹۶ (پایان طرح) ۲۲۹۳۶۶ تا ۳۰۵۸۲۲ مکعب از این مرکز دفن بازکنی شد. قبل از شروع فعالیت‌های پروژه، طرح ایمنی انجام پروژه طرح‌ریزی و در اختیار مسئولان اجرایی قرار گرفت. در طول دوره فعالیت‌ها تلاش شد تا تجهیزات‌به لایه‌های محافظ کف مرکز دفن آسیب وارد نکند. همچنین، وضعیت گازهای موجود در مرکز دفن در محیط نیز توسط یک دستگاه سنجش قابل‌حمل و یک خودروبه‌طوردائم کنترل شد تا از بروز حوادثی مانند نشت و انفجار جلوگیری شود (Forster, ۱۹۹۴).

- ✓ مزایای این پروژه: بازکنی فضای مرکز دفن و تولید انرژی، به‌علاوه بازیافت خاک و مواد ارزشمند
- ✓ معایب پروژه: افزایش میزان خاکستر موجود در محیط به دلیل وجود خاک در زباله‌های بازکنی شده، افزایش بوی نامطبوع به دلیل بازکنی ترانشه‌ها، افزایش ترافیک در مسیر انتقال مواد به زباله‌سوز، افزایش استهلاک تجهیزات و زباله‌سوز به دلیل سایش مواد بازکنی شد حاوی خاک.

استفاده از RDF در کارخانه سیمان

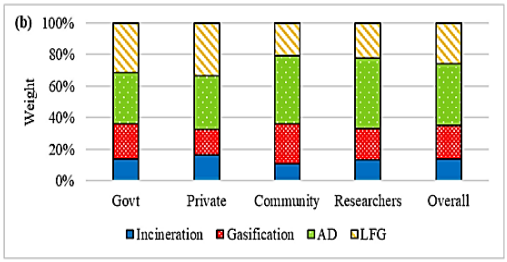
کارخانه سیمان آسیا (پنزا، روسیه) - یک کارخانه سیمان با فرآیند خشک که در سال ۲۰۱۳ راه اندازی شد - قصد دارد از زباله های محل دفن زباله به عنوان RDF برای کوره های سیمان خود در سال ۲۰۲۰ استفاده کند. این پروژه نیمی از مساحت محل های دفن زباله در منطقه را اشغال می کند و به نفع محیط زیست است. در حال حاضر در اکثر مناطق روسیه یک طرح دفع زباله وجود دارد که در آن تا ۹۰٪ زباله ها در محل های دفن زباله در نزدیکی شهرک ها ذخیره می شود. تجزیه مواد مضر در طی احتراق در دمای بالا در کوره های سیمان به اجزای ایمن برای اتمسفر - دی اکسید کربن و بخار آب اتفاق می افتد.باقیمانده خاکستر در کلینکر، خواص مقاومتی بتن را بهبود می بخشد. با حرکت در سیستم احتراق یک کوره، ذرات محصول کلسینه شده مواد مضر و سمی را به هم متصل کرده و خنثی می کنند. مونوکسید کربن و گازهای گوگرد تا ۹۹.۹۶ درصد توسط سیستم فیلتراسیون جذب می شوند.LafargeHolcim از سال ۲۰۱۵ RDF را در کارخانه ای در نزدیکی شهر کالوگا پیاده سازی می کند. کارخانه Krasnoselskstroymaterialy بلاروس در فوریه امسال اعلام کرد قصد دارد استفاده از RDF را نیز آغاز کند. در جدول ۸ انواع تکنولوژی‌های تبدیل پسماند به انرژی آورده شده است.

جدول ۸- برخی تکنولوژی‌های مهم تبدیل پسماند به انرژی

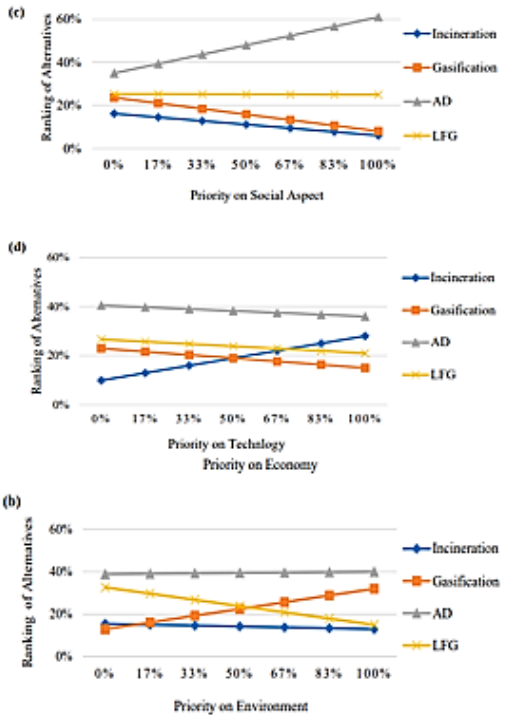
نوع تکنولوژی	نوع فرآیند	پتانسیل بازیابی انرژی به ازای یک تن پسماند جامد شهری (MSW)	نوع ورودی
زباله سوز	سوزاندن زباله در یک محیط کنترل شده در حضور اکسیژن	۲ MJ electricity	بیولوژیکی و چسماند سنتزی خشک
گازی سازی	فرایند ترمودینامیکی که چسماند آلی را به یک گاز سنتز مفید در حضور اکسیژن محدود تبدیل میکند	۲ MJ electricity	مخلوط MSW بدون مواد آلی
هضم بی هوازی	فرایندی که ترکیبات آلی از طریق میکروب‌ها و بدون	۰.۰۴-۰.۰۹ MJ electricity	پسماند آلی بدون فلزات و پلاستیک ها

	اکسیژن می-شکنند.		
گاز لندفیل (LFG)	بوسیله تجزیه بی هوازی جز آلی لندفیل شهری تولید می‌شود	۰.۰۰۳ m^3/min (LFG)	پسماند آلی بدون فلزات و پلاستیک ها
محتوای رطوبت (٪)	هزینه سرمایه گذاری (EUR/ton)	هزینه مدیریت و اجرا (EUR/ton)	انتشار گازهای گلخانه ای kg) eqCO۲/t (of waste
۲۰-۳۰	۸۰-۱۱۵	۱۸۰	۰.۲۲
کمتر از ۱۵	۳۵-۴۵	۳۰-۴۰	۰.۱۱۴
۷۵	۱۲-۱۹	۱۰-۱۵	۰.۲
۷۵	۱.۴	۰.۳	۱-۱.۲

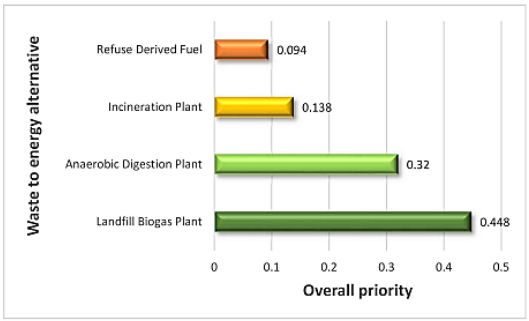
بر اساس مطالعه ای که در شهر مسکو انجام شده است، انواع ترجیحات مدیریت پسماند در شکل های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ آورده شده است (Kurbatova and Abu-Qdais, ۲۰۲۰).



شکل ۱۲- تجمیع ترجیحات از نظر معیارهای فرعی



شکل ۱۳- معیارهای انتخاب در دیدگاه‌های مختلف



شکل ۱۴- ارجحیت روش‌های مختلف پسماند به انرژی

جدول ۹- مقایسه ویژگی‌های RDF تولیدی منابع مختلف (Hemidat et al., ۲۰۱۹)

پارامتر	فنلاند	ایتالیا	انگلستان	امان
ارزش کالری (MJ/Kg)	۱۳-۱۶	۱۵	۱۸/۷	۱۲/۸۴-۱۵/۸۲
درصد رطوبت	۲۵-۳۵	حداکثر ۲۵	۷-۲۸	۲۵-۳۴
درصد محتوای خاکستر	۵-۱۰	۲۰	۱۲	۱۶-۱۹
درصد کلر	<۱/۵*	۰/۹	۰/۳-۱/۲	۱/۲-۰/۵۶

مراحل مختلفی در گازیفاسیون RDF وجود دارد، از جمله خشک کردن، پیرولیز، احتراق و گازی سازی. احتراق سوخت در یک محیط زیر استوکیومتری در ناحیه احتراق اتفاق می‌افتد و گرمای آزاد شده در طی احتراق از

واکنش‌های گرماگیر خشک‌کردن، پیرولیز و منطقه احیایی ناشی می‌شود که در معادلات زیر ذکر شده است.

$$RDF_{wet} \rightarrow RDF_{dry} + H_2O$$

$$C+H_2O \rightarrow CO + H_2 \text{ (water gas reaction)}$$

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO \text{ (Boudouard reaction)}$$

$$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O \text{ (shift reaction)}$$

$$C + 2H_2 \rightarrow CH_4 \text{ (Methanation reaction)}$$

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \text{ (steam reforming)}$$

گاز سنتز حاوی H_2, CO, CO_2, CH_4, C_xH_y می‌باشد (Sharma et al., ۲۰۲۲).

۶- ارجحیت سوخت SRF به سوخت‌های RDF

امروزه به دلایل زیادی از قبیل افزایش رشد شهرنشینی و تمایل افراد به مصرف بیشتر، تولید MSW[1] در شهرها به‌شدت در حال افزایش است. همین موضوع باعث شده است تا سوخت حاصل از پسماندهای جامد شهری، به یک سوخت جایگزین پرکاربرد برای استفاده در صنعت سیمان تبدیل شود. با این وجود بیشتر کارخانه‌های تولید سیمان به علت ماهیت ناهمگنRDF و نیز به علت حضور برخی از مواد که پتانسیل کاهش کیفیت سیمان و افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی را دارند؛ از سوزاندن مستقیم این ماده در کوره‌ها اجتناب می‌کنند. میله‌های سوختی تولیدشده از MSW دارای خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی هستند که به منبع تولیدشان به‌خصوص با توجه به مقدار خاکستر، کلرین، سولفور و رطوبت موجود در آن‌ها بستگی دارد. خواص فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد هرکدام از میله‌های سوختی تولیدشده ازMSW می‌تواند اثرات متفاوتی را در کوره احتراق و متعاقب آن در کیفیت سیمان تولیدشده به وجود آورد؛ بنابراین یکی از راه‌کارهای جایگزین برای کاربرد مستقیمRDF و تولید سوختی همگن، استفاده از روش تبدیل به گاز کردن و SRF است، که می‌توانیم ترکیب یکنواخت‌تری از سوخت را داشته باشیم.

جدول ۱۰- کیفیت RDF به‌دست‌آمده از منابع خانگی و صنعتی Reza et al., ۲۰۱۳)

	ارزش حرارتی MJ/Kg	خاکستر باقیمانده Wt%	مقدار کلر Wt%	مقدار گوگرد Wt%	مقدار رطوبت Wt%
پسماند خانگی	۱۶-۱۲	۲۰-۱۵	۱-۰/۵	-	۳۵-۱۰
پسماند صنعتی	۲۰-۱۶	۷-۵	۰-/۲ <۰/۱	<۰/۱	۲۰-۱۰
پسماند تجاری	۲۱-۱۸	۱۵-۱۰	۱-۰/۲	-	۱۰-۳
پسماند های حاصل از تخریب	۱۵-۱۴	۵-۱	<۰/۱	<۰/۱	۲۵-۱۵

چالش دیگر پیرامون استفاده از RDF در کوره‌های سیمان وجود کلراین موجود در آن است. هنگامی‌که غلظت کلراین موجود در RDF زیاد باشد، باعث می‌شود تا واکنشی بین کلراین و فاز قلیایی سیلیکاته به‌وجود آید که منجر به تولید نمک می‌شود، این نمک‌ها ترک‌های ریزی را به هنگام هیدراتاسیون سیمان به وجود می‌آورند که باعث می شود مقاومت فشاری سیمان تولیدشده کاهش یابد؛ بنابراین ازنقطه‌نظر مقاومت فشاری سیمان تولیدشده و با توجه به نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده، می‌توان دریافت که تا نسبت جایگزینی ۱۰ درصد RDF با پتک به‌عنوان سوخت اصلی، تفاوت قابل‌توجهی در کیفیت سیمان تولیدی مشاهده نشده است Rafat et al., (۲۰۱۰).پارامترهای مهم دیگر برای شناسایی و توصیف عملکرد کاربرد RDF در تولید سیمان، شامل کارایی بتن تازه، زمان‌گیرش اولیه و نهایی سیمان می‌شود. تشکیل مواد هیدراته شده به‌علت وجود مقدار زیاد سولفات و کلراید در خاکستر RDF سوزانده شده می‌تواند منجر به افزایش آب موردنیاز برای رسیدن به کارایی مشخص شود (Ozkan and Banar, ۲۰۱۰). با توجه به پتانسیل موجود برای استفاده از خاکستر حاصل از سوزاندن RDF (که عمدتاً از اکسید فلزاتی چون Ca Fe،Si تشکیل‌شده است. سیکا و همکاران[2] (۲۰۰۷) مشاهده کردند که اگرچه برای تولید سیمان نیاز به افزودن $CaCO_3$ و نیز مقادیر کمی از Fe_2O_3 و SiO_2 است، اضافه کردن خاکستر حاصل از سوزاندن RDF تا حدود ٤٤ درصد به مخلوط اولیه تولید کلینکر، می‌تواند ۲۰ درصد از مصرف $CaCO_3$ موردنیاز در

[1] Municipal Solid Waste

[2] Saikia et al

تولید سیمان را کاهش ده از جهات بسیاری سوخت‌های RDF و SRF شبیه به یکدیگرند. مهم‌ترین شباهت آن‌ها این است پایه اصلی مواد اولیه هر دو پسماندهای شهری است. تفاوت اصلی این دو سوخت کمکی در نحوه تولید، هزینه تولید، انعطاف‌پذیری مصرف و همچنین بازار مصرف آن‌ها است. سوخت‌های RDF با فرض عرضه در بازار همگانی تولید می‌شوند و درنتیجه فرایند تولید آن‌ها برای صنعت خاصی طراحی نمی‌شود و در عمده موارد هزینه تولید نهایی RDF از SRF بیشتر می‌شود و در برخی موارد توجیه‌پذیری طرح را زیر سؤال می‌برد.همچنین از مشکلات مهم سوخت‌های RDF، ارزش حرارتی پایین‌تر از سوخت‌های کمکی SRF است. سطح پایین سوخت‌های RDF به‌دست‌آمده از پسماندهای شهری ایران توسط هراتی و همکاران (۱۳۸٦) موردمطالعه و بررسی‌شده است که سوخت‌های SRF توانایی افزایش ارزش حرارتی تا بیش از ۲ برابر سوخت‌های RDF رادارند.از مزیت‌های مهم دیگرSRF نسبت به RDF، انعطاف‌پذیری بسیار بالا در تولید و تهیه مواد اولیه جهت تولید سوخت کمکی است. در سوخت‌های SRF می‌توان تا بیش از ۸ الی ۱۰ نوع پسماند شهری، صنعتی، کشاورزی، نفتی و غیره را جهت تولید سوخت‌های ترکیبی کمکی استفاده کرد. این موضوع علاوه بر افزایش ارزش حرارتی، تولنایی بهبود کیفیت سیمان و همچنین امحای پسماندهای ویژه و خطرناک و درنتیجه بهبود وضعیت محیط‌زیست منطقه را به دنبال دارد.در جامع بین‌المللی طی سال‌های اخیر سوخت SRF جایگزین سوخت RDF شده است. عمده صنایع سیمان فعال در اروپا و آسیا سیستم‌های تولید و تزریق سوخت RDF خود را با توجه به پسماندهای منطقه تغییر داده و به سوخت‌های بهینه‌شده SRF تبدیل کرده‌اند.طبق تجارب بین‌المللی گزارش‌شده، یکی از دلایل محبوبیت بیشتر SRF نسبت به RDF، کیفیت پایدارتر و ثابت‌تر و همچنین استانداردهای مناسب‌تر (مانند استلندارد بین‌المللی CEN/TC۳٤۳) سوخت‌های SRF نسبت‌به RDF است Cuperus, (۲۰۱۵).از دیدگاه پروسه تولید سوخت‌های SRF نسبت به RDF، زمان و هزینه کمتری می‌برد و درنهایت کیفیت مناسب‌تری هم برای استفاده در کوره‌های دوار سیمان نتیجه خواهد داد.درمجموع می‌توان گفت که توسعه سوخت‌های کمکی SRF با توجه به مزایای اقتصادی، محیط‌زیستی و همچنین صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی و بهینه‌سازی مصرف سوخت می‌تواند از اولویت‌های توجه وزارت نفت و سایر ارگان‌های مرتبط باشد. دست‌آوردهای این طرح در مقیاس کلان ملی بسیار قابل‌ملاحظه بوده و با توجه به میزان سرمایه‌گذاری موردنیاز توسعه سوخت‌های SRF توجیه‌پذیر خواهد بود.با توجه به موارد گفته‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که تصمیم بین‌المللی گرفته‌شده درباره جایگزینی سوخت‌های کمکی SRFبا RDF، تصمیم درست و منطقی بوده است.به‌طور خلاصه، مزیت‌های اصلی استفاده از سوخت‌های کمکی SRF در صنعت سیمان شامل موارد زیر خواهد بود:

۱. صرفه‌جویی در سوخت کوره‌هایی صنعت سیمان (خصوصاً مازوت)
۲. افزایش توان صادرات (کاهش مصرف داخلی)
۳. کاهش هزینه‌های انتقال و سوخت‌رسانی به صنایع سیمان
٤. کاهش وابستگی صنعت سیمان به سوخت مایع
٥. کاهش قیمت تمام‌شده سیمان
٦. تأمین قسمت اندکی از مواد اولیه سیمان و کاهش انرژی مصرفی در قسمت تهیه مواد
۷. کاهش هزینه‌های مدیریت پسماند شهرداری‌ها
۸. کاهش آلودگی‌های تولیدشده توسط واحد خدمت شهری شهرداری‌ها،
۹. کاهش آلودگی صنعت سیمان
۱۰. کاهش دی‌اکسید کربن (CDM)
۱۱. امکان دفع پسماندهای ویژه و صنعتی
۱۲. بهبود کیفیت سیمان
۱۳. اشتغال‌زایی
۱٤. توسعه اقتصاد مقاومتی
۱٥. توسعه اکولوژی صنعتی
۱٦. توسعه پایدار

۷- استانداردهای کیفیت سوخت مشتق از پسماند

بعضی از مهم‌ترین خصوصیاتی را که باید مورد ارزیابی قرار گیرد(شامل ماهیت فیزیکی و شیمیایی سوخت مشتق از پسماند می‌باشد؛ تا نشان داده شود که محصول تولیدی دارای مشخصات مناسب و سودمندی برای هدف ما است و باعث ایجاد آسیب زیست‌محیطی نمی‌شود در جدول ۱۱ بیان‌شده است Environment Protection) Authority, ۲۰۱۱).

جدول ۱۱- خصوصیات سوخت مشتق از پسماند(Environment Protection Authority, ۲۰۱۱)

مشخصه	جزئیات
پسماند و دیگر ترکیبات سوخت مشتق از پسماند	نوع پسماندها و سهم آن‌ها در سوخت مشتق از پسماند باید رسیدگی شود. پسماندها دارای ارزش حرارتی و یازده‌ای احتراق مختلفی هستند و قابلیتشان به منظور استفاده به عنوان سوخت مناسب متغییر است. سوختن بعضی از مواد می‌تواند با آزاد سازی مواد شیمیایی نامناسبی همراه باشد که باید از آن‌ها اجتناب کرد (همچونPVC ها). همچنین استفاده از بعضی پسماندها ممنوع می‌باشد.
ارزش گرمایی و بازده ای احتراق	سوخت مشتق از پسماند به منظور سودمندی ، دوام و موثر بودن به عنوان مکمل یا جایگزین سوخت، باید دارای ارزش حرارتی بالایی باشد و با مشخصاتی تولید گردد که احتراقی کارآمد و موثر داشته باشد .
مقدار آب	رطوبت موجود در سوخت مشتق از پسماند با گرفتن انرژی به منظور تولید بخار می تولند در مراحل اولیه احتراق باعث پایین آمدن بازده احتراق گردد . علاوه بر این ، رطوبت‌بالاتربدین معنا است که مواد در دمای پایین تر می سوزند و در نتیجه احتمال تشکیل دیوکسین و فوران افزایش می‌یابد .
مقدار گوگرد و کلر	محتوای کلر ، گوگرد و تولید گازهای گلخلنه ای ناشی از احتراق سوخت مشتق از پسماند باسد مورد بررسی قرار گیرد . برای مثال کلر می تواند در شکل دهی دیوکسین شرکت داشته باشد . باید در دسترس ترین فناوری قابل حصول به شیوه اقتصادی برای اطمینان از جذب موثر گاز کلر و دیگر آلوده کنندها بکار گرفت شود .
انتشار فلزات سنگین و مواد زائد باقی مانده	احتراق سوخت مشتق از پسماند باید در معرض ارزیابی خطربه منظور لندازه گیری گازها و ذرات منتشره به اتمسفر قرار گیرد . در احتراق سوخت های مشتق از پسماند باید تولید گازهای گلخانه ای در مقایسه با سوخت های فسیلی و یا دیگر سوخت های تجاری استاندارد ، برابر و یا کمتر باشد . همچنین ترکیب ، مقصد و خطرات بالقوه از خاکستر باقی مانده نیز باید مورد ارزیابی قرار گیرد . زیرا خاکستر موجود می تواد غنی از هرگونه فلز سنگین باشد .
خواص فیزیکی	به منظور احتراق موثر ، سوخت مشتق از پسماند باید دارای خواص فیزیکی همچون توزیع یکنواخت اندازه ذرات باشد .

تضمین کیفیت در تولید سوخت مشتق از پسماند نیازمند این است که محصول تولیدی ارزش گرمایی بالا و غلظت پایینی از مواد شیمیایی سمی، مخصوصاً فلزات سنگین و کلر داشته باشد. جنبه‌های کیفی همچنین بر روی موفقیت و شکست اقتصادی سوخت مشتق از پسماند تأثیر دارد و توسط سه گروه ذینفع تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان بالقوه و مقامات دولتی مربوطه موردبررسی قرار می‌گیرد. به دلیل تفاوت دیدگاه این سه گروه، کیفیت سوخت مشتق از پسماند توصیه‌شده از یک گروه به گروه دیگر متفاوت است. اگرچه هنوز استاندارد کیفی برای این محصول در آسیا وجود ندارد اما ما می‌توانیم استانداردهای اروپایی را به‌عنوان خطمشی برای خود قرار دهیم. جدول ۱۲ استانداردهای سوخت مشتق از پسماند مصرفی در صنایع سیمان چهار کشور اروپایی را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲- استاندارد سوخت مشتق از پسماند در چهار کشور اروپایی(Hasaneigii et al., ۲۰۱۲)

پارام تر	واح د	MSW ۲۵ MJ /Kg	پلاس تیک، کاغذ، منسو جات، چوب، پسما ند	RDF تیپ I	RDF تیپ II	RDF تیپ III	Specialbranse A	Latranse
C۱	%	-	۱/۵	۰/۵	۰/۵	۱/۵	۱/۰	۱/۰
Sb	Mg /kg	۵	۱۲۰	-	-	-	-	-
As	Mg /kg	۱۵	۱۳	-	-	-	-	-
Be	Mg /kg	۵	۲	-	-	-	-	-
Cd	Mg /kg	۲	۹	٤/۰	٤/۰	۵/۰	۱۰	۵
Cr	Mg /kg	۱۰۰	۲۵۰	-	-	-	۳۰۰	۳۰
Cu	Mg /kg	۱۰۰	۷۰۰	-	-	-	-	-
Pb	Mg /kg	۲۰۰	٤۰۰	-	-	-	۳۵۰	۱۰۰
Hg	Mg /kg	۰/۵	۰/۵	۰/۲	۰/۲	۰/۵	-	۵
Ni	Mg /kg	۱۰۰	۱٦۰	-	-	-	-	۱۰
Tl	Mg /kg	۳	۲	-	-	-	-	-
Sn	Mg /kg	۱۰	۲	-	-	-	-	-
V	Mg /kg	۱۰۰	۲۵	-	-	-	-	۵۰
Zn	Mg /kg	٤۰۰	-	-	-	-	۲۰۰۰	-

در هنگام استفاده از پسماند به‌عنوان سوخت جایگزین در صنعت سیمان باید به ۲ نکته مهم توجه نمود؛ شرایط سوختن (دمای بالا به همراه زمان ماند طولانی و فضای اکسیداسیون) و دیگری محیط قلیایی طبیعی مواد خام است. این شرایط مخصوصاً برای اطمینان از سطح بالای درهم شکستن مواد آلوده‌ای همچون دیوکسین‌ها و فوران‌ها مطلوب است. درواقع، گزارش SINTEF بیان می‌کند با داشتن موادی با دمای تقریبی ۱۴۵۰درجه سانتی‌گراد و دمای گاز کوره‌ای بالاتر از ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ماندی در حدود ۸ ثانیه و به بالا، پیرولیز کامل یا درهم شکستن پسماندهای ارگانیک تضمین می‌شود.کوره‌های دوار سیمان شرایط مناسبی برای سوزاندن سوخت‌های پسماند به دلایل متعدد ایجاد می نمایند که عبارت‌اند از :زمان کافی (همان‌طوری که در شکل نشان می‌دهد زمان‌های اقامت گاز و مواد بیشتر از ٤ ثانیه است)، دمای بالا (همان‌طور که در شکل نشان می‌دهد دمای گاز و مواد بالاتر از ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد است)، درجه اختلاط و اغتشاش بالا، ظرفیت حرارتی بالا، (به‌طوری‌که دما نمی‌تواند به‌سرعت تغییر کرده درنتیجه از تخریب کامل پسماند اطمینان ایجاد می‌کند)، اتمسفر اکسیدکننده، محصولات فلزی و غیرفلزی حاصل از سوزاندن به‌طور کامل جذب می‌شوند، پسماند را داغ‌تر از سوزاننده‌های تجاری پسماند خطرناک می‌سوزانند ۳۰ (درصد دمای بالاتر) و هیچ منبع اضافی موردنیاز نیست، تمام نیازمندی‌های قوانین زیست‌محیطی اتحادیه اروپا را مربوط به سوزاندن پسماندهای خطرناک برآورده می‌کند و محیط قلیایی کوره پسماند شرایط سوزاندن پسماندهای اسیدی را فراهم می‌کند (Mokrzycki and Uliasz-Bocheńczyk, ۲۰۰۳).

را از کشورهای دیگر تامین می‌کنند، استفاده از انرژی‌های پاک و یا بازیافت انرژی از مواد زائد به‌عنوان سوخت جایگزین، بدلیل ارزان، قابل دسترس بودن و تبدیل سریع به انرژی، مورد توجه قرار گرفته است. در حال حاضر تولید و انباشت انواع زباله‌های خانگی و صنعتی، ابعاد تازه‌ای به خود گرفته و بصورت یک معضل مهم مطرح شده و هزینه بالای دفع زباله‌ها، مسئولان امر را واداشته تا به فکر بازیافت و استفاده مجدد از آن‌ها در زمینه‌های مختلف باشند. در این راستا پس از تحقیقات و بررسی‌های بسیار، دو ایده اساسی مطرح شده که یکی استفاده از زباله‌ها بصورت سوخت برای تولید انرژی حرارتی در صنایع و دیگری استفاده از آن‌ها به‌عنوان مواد مکمل برای بهبود بخشیدن به خواص محصول تولید شده با کاهش قیمت آن، مانند تهیه بتن‌های ترکیبی، می‌باشد. در راستای استفاده از زباله به‌عنوان سوخت، صنعت سیمان، دارای پتانسیلی قوی در استفاده مجدد از آن‌ها می‌باشد. از آنجایی که در این بخش به مقادیر زیادی انرژی حرارتی نیاز می‌باشد، استفاده از این ضایعات به‌عنوان سوخت بسیار مفید و کارا خواهد بود. درصد زیادی از زباله‌ها را اجزای قابل احتراق تشکیل می‌دهند که می‌توان از آن‌ها برای تولید انرژی گرمایی استفاده کرد. در عین حال درصد بالایی از اجزای قابل احتراق در زباله‌های جامد شهری MSW، تجزیه‌پذیر بوده و می‌توانند به سوخت‌های گازی تبدیل گردند و از این سوخت‌ها برای تولید انرژی گرمایی استفاده نمود. به طور کلی جداسازی اجزای قابل احتراق از MSW را RDF گویند که تبدیل آن‌ها به انرژی، با استفاده از روش‌های پیش فراورش (Front - end) و یا روش های تبدیلی Back) (end -انجام می‌شود . در اصل RDF یک روش بازیافت انرژی است.

۸- نتیجه‌گیری

امروزه کمبود انرژی یک مسئله بسیار مهم در جهان بوده و با توجه به اینکه بسیاری از کشورها، سوخت مورد نیاز خود

منابع

- ابطحی محصل، م. رفیعی، ز. جرقی، س. ۱۳۹۲. بررسی تولید سوخت حاصل از زباله RDF. نهمین همایش ملی بهداشت محیط.
- صنعت سیمان ایران. هفتمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست، ۱۵-۱۹ آذر، دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران، ۲۰۰-۲۱۳
- کفاش بازاری؛ ع.ا. چالش عدم مصرف RDF در صنعت سیمان ایران. توسعه سبز، ۵۵-٦٤.

- ایران. سومین همایش ملی مدیریت پسماند، تهران، سازمان شهرداریها و دهداریاری‌های کشور، سازمان حفاظت محیط زیست،۱-۲ اردیبهشت ، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی۳۰۳-۳۱۲.
- Alam, S. Rahman, KS. Rokonuzzaman, M. Salam, P.A. Sazal Miah, M. Das, N. Chowdhury, S. Channumsin, S. Sreesawet, S. Channumsin, M. ۲۰۲۲.
- Bosoaga, A. Masek, O. Oakey, J.E. ۲۰۰۹.CO۲ Capture Technologies for Cement Industry. Energy Procedia, ۱: ۱۳۳-۱۴۰.
- Boyer, M., & Ponssard, J. P. ۲۰۱۳. Economic analysis of the European cement industry. CIRANO-Scientific Publication (۲۰۱۳s-۴۷).
- C. Tam, M. Taylor and D. Gielen, "Energy Efficiency and CO۲ Emissions from the Global Cement Industry," ۲۰۰۶, IEA-WBCSD workshop.
- Conesa, J. A., Gálvez, A., Mateos, F., Martín-Gullón, I., & Font, R. ۲۰۰۸. Organic and inorganic pollutants from cement kiln stack feeding alternative fuels. Journal of Hazardous Materials, ۱۵۸(۲), **۵۸۵-۵۹۲.**
- Cuperus, G. (۲۰۱۵). The difference between RDF and SRF. Retrieved from http://resource.co/article/difference-between-rdf-and-srf-۱۰۱۵۶.
- EIA Coal. Available online: https://www.eia.gov/coal/production/quarterly/co۲_article/co۲.html (accessed on ۳ July ۲۰۲۲).
- Forster, G. ۱۹۹۴. Assessment of Landfill Mining and the effects of Age on Combustion of recovered Municipal Solid Waste. Paper presented at the Landfill Reclamation Conference, Lancaster, PA.
- Gregg, J. S., Andres, R. J. and Marland, G. ۲۰۰۸. China: Emissions pattern of the world leader in CO۲ emissions from fossil fuel consumption and cement production. Geophysical Research Letters, **۳۵(۸): ۵-۱۰, L۰۸۸۰۶,** doi: **۱۰.۱۰۲۹/۲۰۰۷GL۰۳۲۸۸۷.**
- Habert, G., Billard, C., Rossi, P., Chen, C. and Roussel, N. (۲۰۱۰). Cement production technology improvement compared to factor ۴ objectives. Cement and Concrete Research, ۴۰(۵): ۸۲۰-۸۲۶.
- Hasaneigi, A. Hongyou, L. Price, L. Williams, CH. ۲۰۱۲ International Best Practices for Pre-Processing and Co-Processing Municipal Solid Waste and Sewage Sludge in the Cement Industry, Berkeley National Laboratory, ۲۱۳-۲۲۵.
- Hemidat, S.; Saidan, M.; Al-Zu'bi, S.; Irshidat, M.; Nassour, A.; Nelles, M. Potential Utilization of RDF as an Alternative Fuel to be Used in Cement Industry in Jordan. Sustainability ۲۰۱۹, ۱۱, ۵۸۱۹. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/su۱۱۲۰۵۸۱۹.
- https://www.marketwatch.com/press-release/global-refuse-derived-fuel-rdf-market-size-growth-rate-analysis-۲۰۲۳-by-market-overview-segments-regions-market-share-and-forecast-to-۲۰۲۷-**۲۰۲۳-۰۱-۲۷.**
- Kääntee, U., Zevenhoven, R., Backman, R. and Hupa, M. ۲۰۰۴. Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modelling. Fuel Processing Technology, ۸۵(۴): ۲۹۳-۳۰۱.
- Karstensen, K. H. ۲۰۰۷. A Literature Review on Co-processing of Alternative Fuels and Raw Materials and Hazardous Wastes in Cement Kilns. Department for Environmental Affairs and Tourism, Republic of South Africa. Descargable en http://www. Environment. Gov. za/hotissues/۲۰۰۸/cementproduction/cement. html [Consultado el ۲ de enero de ۲۰۰۹.
- Kurbatova, A.; Abu-Qdais, H.A. ۲۰۲۰. Using Multi-Criteria Decision Analysis to Select Waste to Energy Technology for a Mega City: The Case of Moscow. Sustainability, ۱۲, ۹۸۲۸.
- Marland, G., Boden, T., Andres, R., Brenkert, A., & Johnston, C. ۲۰۰۴. Global, regional, and national fossil fuel CO۲ emissions. Trends: A compendium of data on global change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

- Mokrzycki, E. and Uliasz-Bocheńczyk, A. ۲۰۰۳. Alternative fuels for the cement industry. Applied Energy, ۷٤(۱), ۹٥-۱۰۰.
- Mokrzycki, E., Uliasz-Bocheńczyk, A., & Sarna, M. ۲۰۰۳. Use of alternative fuels in the Polish cement industry. Applied Energy, ۷٤(۱), ۱۰۱-۱۱۱.
- Municipal Solid Waste Management—Towards Achieving Sustainable Development Goals. Sustainability, ۱٤(۱۹), ۱۱۹۱۳; https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/su۱٤۱۹۱۱۹۱۳.
- Ozkan, A. and Banar, M. ۲۰۱۰. Refuse derived fuel (RDF) utilization in cement industry by using Analytic Network Process (ANP). Chem Eng Trans, ۲۱: ۷٦۹-۷۷٤.
- Rafat, F., Golein, B., Neamatollahi, S., Hayatbakhsh, E., Fifayi, R. and Hallagsany, M. ۲۰۱۰. Quantitative and qualitative evaluation of imported Clementine mandarins on common rootstocks in west of Mazandaran province.
- Reza, B., Soltani, A., Ruparathna, R., Sadiq, R., & Hewage, K. (۲۰۱۳). Environmental and Economic Aspects of Production and Utilization of RDF as Alternative Fuel in Cement Plants: A Case Study of Metro Vancouver Waste Management. Resources, Conservation and Recycling, ۸۱, ۱۰٥-۱۱٤. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.resconrec.۲۰۱۳,۱۰,۰۰۹.
- Sarc, R., Lorber, K., Pomberger, R., Rogetzer, M., & Sipple, E. ۲۰۱٤. Design, quality, and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry. Waste Management & Research, ۳۲(۷): ٥٦٥-٥۸٥.
- Sarquah, K.; Narra, S.; Beck, G.; Bassey, U.; Antwi, E.; Hartmann, M.; Derkyi, N.S.A.; Awafo, E.A.; Nelles, M. Characterization of Municipal Solid Waste and Assessment of Its Potential for Refuse-Derived Fuel (RDF) Valorization. Energies ۲۰۲۳, ۱٦, ۲۰۰. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/en۱٦۰۱۰۲۰۰.
- Sharma, P. Sheth, P. Mohapatra, B.N. ۲۰۲۲. Recent Progress in Refuse Derived Fuel (RDF) Co-processing in Cement Production: Direct Firing in Kiln/Calciner vs Process Integration of RDF Gasifcation. Waste and Biomass Valorization, ۱۳:٤۳٤۷–٤۳۷٤.
- Shehata, N. Obaideen, K. Sayed, E.T. Abdelkareem, M.A. Mahmoud, M.S. El-Salamony, A.R. Mahmoud, H.M. Olabi, A.G. ۲۰۲۲. Role of refuse-derived fuel in circular economy and sustainable development goals. Process Safety and Environmental Protection, ۱٦۳: ٥٥۸-٥۷۳.
- Sivapullaiah, P. Biag, M.A.A. ۲۰۱۱. Gypsum treated fly ash as a liner for waste disposal facilities. Waste Management, ۳۱(۲):۳٥۹-٦۹.
- Supino, S., Malandrino, O., Testa, M. and Sica, D. ۲۰۱٦. Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences. Journal of Cleaner Production, ۱۱۲: ٤۳۰-٤٤۲.
- Supino, S., Malandrino, O., Testa, M. and Sica, D. ۲۰۱٦. Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences. Journal of Cleaner Production, ۱۱۲: ٤۳۰-٤٤۲.
- Tchobanoglous, G. and Kreith, F. (۲۰۰۲) Handbook of Solid Waste Management. ۲nd Edition, McGraw Hill Handbooks. New York.
- Wojtacha-Rychter, K.; Smoli ´nski, A. ۲۰۲۲. Multi-Case Study on Environmental and Economic Benefits through Co-Burning Refuse-Derived Fuels and Sewage Sludge in Cement Industry. Materials, ۱٥, ٤۱۷٦. https://doi.org/ ۱۰,۳۳۹۰/ma۱٥۱۲٤۱۷٦.

RDF a response to sustainable cement along with its economical chain

Haniyeh Abbaslou[۱*]؛ Bahador Abolpour[۲]؛ Mehrdad Teklozadeh[۳]

۱*– Civil–Environmental Department, Sirjan University of Technology

۲– Chemical Engineering Department, Sirjan University of Technology

۳– BSc. Student, Chemical Engineering Department, Sirjan University of Technology

Corresponding author's email: abbaslou@gmail.com

Abstract

In the near future and with the cost of energy becoming more expensive, more plants tend to use waste for energy production. The cost of landfilling is increasing and it is increasing the cost of recycling. On the other hand, alternative fuels are necessary for the production of efficient cement from an economic point of view. Wastes, packaging, and other materials can replace expensive fossil fuels such as coal and oil. But first, they should be converted into high-quality fuel (RDF: Refuse Derived Fuel) and stored safely in factories. This is a duty cement production companies set for themselves by being a member of the Cement Sustainability Initiative (CSI) and the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). The goal has been to replace expensive fossil energy sources such as coal, gas, and oil in production and reduce $CO_۲$ emissions. This study provides valuable insights into RDF production as a sustainable component of an integrated MSW management system, especially for developing countries, in order to achieve ۱۷ SDGs (۱۷ Sustainable Development Goals) and a circular economy. Suitable RDF has higher moisture, ash, chlorine, sulfur, and nitrogen content than LHV municipal solid waste.

Introduction

A part of flammable urban solid waste, including a mixture of paper, cardboard, plastic, fabric, leather, and wood that does not have a foul smell and can be used to produce a product with a high calorific value, is called RDF. In fact, RDF is produced from domestic and commercial waste or waste, which includes biodegradable materials as well as plastic, from which non-combustible materials such as glass and metals are removed and the remaining materials are crushed. They become The main application of RDF is to use as the main or supplementary fuel in boilers and furnaces (Sharma et al., ۲۰۲۲; Shehata et al., ۲۰۲۲). Some alternative fuels include ۱- Solid Recovered Fuel (SRF) from household waste, ۲- Meat and Bone Meal (MBM), ۳- Chemfuel made from Industrial solvents, ٤- Shredded tires (TDF: Tire-derived Fuel), ٥- Biofuels or biomass (Kofash Bazari, ۲۰۱۹).

One of the ways that reduce the human need for fossil fuels is the use of other energies such as clean energies as well as energies from waste recycling. The use of these methods not only provides the required energy but also supports the environment. Refuse-derived fuel (RDF) is also a new method of energy production. This type of fuel is cheap and available, and it turns into the needed energy faster. Using RDF as a sustainable fuel in industries is economically more affordable and also RDF is an inexhaustible source of energy with minimal pollution. By converting waste into RDF, it is possible to prevent the problems of improper disposal of waste, which lead to the spread of dangerous diseases and creates unpleasant landscapes, and help preserve the environment. Proper use of these solutions in the cement industry can be an effective step towards the concrete production industry and sustainable development.

Methodology

Solid waste management is one of the areas of activity of municipalities with the aim of ensuring the health and safety of society as well as preserving the environment. Solid waste management consists of a set of complementary activities with an environmental approach in order to reduce the amount of waste production, recover value from waste and dispose of waste. The most desirable and logical method of solid waste management is to recover the value of waste by converting it into fuel and energy. Due to the high energy consumption in the cement industry, the cement industry has been the subject of research for many years in order to use raw materials and alternative fuels to help reduce the consumption of natural resources without affecting the quality of cement or increasing environmental impacts.Cement kilns use different sources of energy to produce the high temperatures needed to make clinker. The most famous sources of fuel for the cement industry include coal, fuel oil, coking coal, and natural gas (Bosoaga et al., ۲۰۰۹).

The use of SRF auxiliary fuels as self-ignition in cement industry furnaces began in the ۱۹۷۰s and has been used in many cement industrial units as an auxiliary fuel along with the primary inputs to the furnace.The use of RDF fuel in the cement industry is suitable due to the special conditions of the cement kiln. The high temperature of the furnace, as well as the significant length and width of the furnace, which maximizes the level of energy exchange between the burner and waste, as well as waste and clinker, causes complete combustion of the fuel and also solves the problem of the waste being pathogenic. In addition to this high temperature, the high speed of gas flow in the cement kiln and the long-term storage of ash particles reduce the formation of environmental pollutants. In the international community, SRF fuel has replaced RDF fuel in recent years. Major cement industries operating in Europe and Asia have changed their RDF fuel production and injection systems according to regional wastes and turned them into optimized SRF fuels. Considering the above, it can be concluded that the international decision to replace SRF auxiliary fuels with RDF was a correct and logical decision.

Conclusion

Today, the lack of energy is a very important issue in the world, and considering that many countries supply their fuel from other countries, the use of clean energy or the recycling of energy from waste materials as an alternative fuel, due to its cheapness, availability, and quick conversion into energy, it has been considered. Currently, the production and accumulation of all kinds of household and industrial wastes have taken on new dimensions and have become an important problem, and the high cost of waste disposal has forced the authorities to think about recycling and reuse. be in different fields. In this regard, after much research and investigation, two basic ideas have been proposed, one is to use waste as fuel to produce thermal energy in industries, and the other is to use them as supplementary materials to improve product properties. Produced by reducing its price, it is like preparing mixed concretes. In line with the use of waste as fuel, the cement industry has a strong potential in reusing them. Since large amounts of thermal energy are needed in this sector, using these wastes as fuel will be very useful and efficient. A large percentage of waste consists of combustible components that can be used to generate heat energy. At the same time, a high percentage of combustible components in municipal solid waste MSW are degradable and can be converted into gaseous fuels and these fuels can be used to produce thermal energy. In general, the separation of combustible components from MSW is called RDF, and their conversion to energy is done using pre-processing methods (Front-end) or conversion methods (Back-end). Basically, RDF is an energy recycling method.

Keywords

RDF; Cement;Waste; Fossil fuels, Sustainability