

بررسی فناوری گازسازی پلاسمایی در تبدیل پسماند به انرژی

مریم فاتحی فر^۱، جلال شایگان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۱/۲۷

پیام‌نگار: shayegan@sharif.edu

چکیده

پسماند جامد از معضلات امروز جهان است. از روش‌های پردازش پسماند می‌توان به خاکچال، زیاله‌سوزی، هاضم بی‌هوازی، گازسازی و آتش‌کافت اشاره کرد. این روش‌ها دارای معایبی‌اند و پاسخگوی کامل و مطمئن نیاز بشر برای امحاء زیاله نبوده‌اند. از این رو، نیاز به معرفی روش بهتر احساس می‌شود. جدیدترین روش ارائه شده، گازسازی پلاسمایی است. اولین نمونه آزمایشگاهی آن در سال ۱۹۹۸ اجرا شد. به روش قوس پلاسماء، به علت وجود الکترون‌های آزاد می‌توان به دماهایی تا ۵۰۰۰ درجه سلسیوس دست یافت. این دما می‌تواند تقریباً همه‌ی مواد را به گاز تبدیل کند، به شرطی که محیط در حالت کمبود اکسیژن باشد. این فرایند شامل چهار مرحله تفکیک و پیش‌پردازش پسماند، پردازش پسماند درون راکتور، تصفیه و پالایش گاز، و تولید انرژی است که در مقاله توضیح داده شده‌اند. ترکیبات عمده‌ی گاز خروجی عبارت‌اند از CO_2 ، CO ، H_2 و فرایند پلاسمای دومرحله‌ای دارای ظرفیت پذیرش خوراک بالاتر و کیفیت گاز سنتزی بهتری است. این فرایند نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه‌ی گزافی دارد. البته از نظر اقتصادی به صرفه است.

کلیدواژه‌ها: پسماند، پلاسماء، گازسازی، انرژی، بازیافت، راکتور، بازده.

۱. مقدمه

امروزه به علت نیاز شدید به انرژی و توجه ویژه به محیط‌زیست، به پسماند جامد^۱ به‌عنوان یک منبع انرژی نگرینسته و در این جهت تلاش می‌شود که بتوان زیاله را با کمترین میزان تولید آلودگی زیست محیطی به محصول مفید تبدیل کرد [۲]. در آمریکا، راهکارهای بازیافت پسماند خشک، تولید پوسال^۲، خاکچال بهداشتی، دفن و تولید انرژی به‌کار گرفته می‌شود [۳]. در اروپا و ژاپن، خاکچال قابل بازیافت ممنوع شده است و در نتیجه به‌غیر از دفن، سایر راهکارها را به‌کار می‌گیرند. برنامه‌های مدیریتی با اهداف

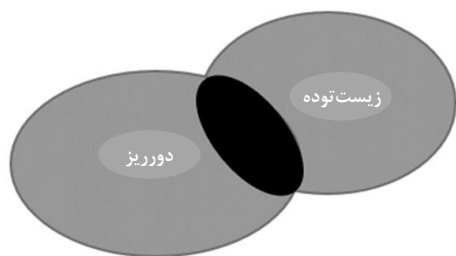
پسماند شهری مخلوطی از مواد زائد خانگی و تجاری است که در هر منطقه شهری تولید می‌شود. با رشد روزافزون جمعیت جهان و پیشرفت صنعت، تولید زیاله در حال افزایش است. روش‌های مختلف مدیریتی برای دفن و سوزاندن زیاله ارائه شده است. در کشورهای صنعتی، در دهه ۱۹۳۰ میلادی، علاوه بر جمع‌آوری و حمل‌ونقل زیاله، شروع به انجام عملیات دفن آن‌ها در زمین و پوشاندنشان با خاک کردند. در دهه ۱۹۷۰ میلادی نگاه جدیدی به زیاله شکل گرفت، و کاهش تولید و بازیافت مورد توجه قرار گرفت [۱].

1. Solid Waste
2. Compost

* تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

به‌طور کلی، در دو روش گفته‌شده در قبل، واکنش‌های شیمیایی که منجر به تجزیه پسماند می‌شود، مایعاتی تولید می‌کند که امکان دارد وارد آب و خاک شود و آلودگی شدید آن‌ها را در پی داشته باشد [۶].

گازسازی^۴ روش جدیدتری است که در ۳۰ سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است. فرایند گازسازی در دمای بالا و در حضور عامل گازسازی (اکسیدکننده)، جامدات و مایعات کربن پایه را به گاز قابل احتراق تبدیل می‌کند. مقدار اکسیژن تزریقی به سیستم، کنترل شده است. حرارت تولیدشده در واکنش‌های احتراقی، دمای فرایند را بالا نگه می‌دارد.



شکل ۱. دورریز مناسب برای گازسازی [۷].

آتش‌کافت^۵ عملیات گازسازی نامستقیم است که در آن از گازهای خنثی به‌عنوان عامل گازسازی استفاده می‌شود [۷]. این فرایند در غیاب هوا انجام می‌شود و محصولات آن عبارت‌اند از قیر، واکس و گازهای قابل احتراق. معمولاً در صنعت عملیات پیرولیز همراه با عملیات گازسازی است و به‌تنهایی انجام نمی‌شود [۸]. مواد جامد به محصولات قابل بازیافت تبدیل می‌شود، و معمولاً محصولات متنوعی‌اند و جداسازی آن‌ها از یکدیگر دشوار است [۵].

متأسفانه این روش‌ها پاسخگوی مناسب و ارزنده نیاز بشر نبوده، و از این‌رو نیاز به ارائه فناوری جدید در راستای بهبود امحاء پسماند جامد و تولید محصول ارزشمند احساس می‌شود. هدف از نگارش این مقاله، معرفی یک روش جدید و توانمند برای امحاء پسماند جامد است.

۲. فناوری پلاسما

فناوری قوس پلاسما یکی از جدیدترین و پیشرفته‌ترین روش‌ها

اجتناب از تولید پسماند، کاهش تولید، باز مصرف، بازیافت، بازیابی، پردازش و در نهایت دفن بهداشتی در بسیاری از کشورها معرفی شده‌اند و در سطوح مختلفی در حال اجرا هستند. هدف از این برنامه‌ریزی‌ها کاهش حجم زباله، کاهش هزینه‌های پردازش و دفع زباله و از بین بردن آلودگی زیست‌محیطی است. جدیدترین و مهم‌ترین این برنامه‌ریزی‌ها تولید انرژی از پسماند است. این امر به کاهش دفن، درآمد مالی و تنوع‌بخشی به منابع تولید انرژی می‌انجامد [۲].

روش خاکچال^۱ از عمده‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای است. ۳۷٪ گازهای گلخانه‌ای تولیدشده در آمریکا ناشی از گورستانهای زباله است [۳]. البته افزودن دستگاه‌های تولید انرژی به گورستان زباله و استفاده از گاز متان تولیدشده یکی از روش‌های مثبت اقتصادی - زیست‌محیطی است. ولی شیرابه تولیدشده در گورستان زباله نیاز به مراقبت ویژه دارد. در نتیجه، نیاز به ابداع روش‌های نو با بازده بالاتر و مساحت موردنیاز کمتر احساس می‌شود [۴].

زباله‌سوزی^۲ راه‌حل دیگری است که در آن احتراق کنترل شده مواد در محیط غنی از اکسیژن رخ می‌دهد. مواد زائد اکسید می‌شوند و محصولات خروجی عبارت‌اند از کربن دی‌اکسید، آب، خاکستر و حرارت. حرارت حاصل را می‌توان برای تولید انرژی و برق به کار گرفت [۵]. آلاینده‌های هوا شامل سولفور و هالوژن‌ها و فلزات سنگین نیز تولید می‌شوند که در نتیجه آن نیاز به صافش قوی برای حذف دی‌اکسید و فوران است. آمریکا از سال ۲۰۰۴ نصب زباله‌سوز جدید را ممنوع کرده است. این فناوری به دلیل سادگی اجرا دارای مزایای زیادی است [۴].

هاضم‌های بی‌هوازی^۳ روش دیگری است که در آن ابتدا زباله تفکیک و خرد می‌شود. سپس در مخازنی در دمای بالاتر از محیط هضم بی‌هوازی روی آن انجام می‌شود و زیست‌گاز تولیدی پس از تصفیه برای تولید برق مصرف می‌شود. زیست‌گاز دارای قابلیت اشتعال و از دو جزء عمده متان و کربن دی‌اکسید تشکیل شده است. این فناوری از قابلیت امحاء زباله‌های شهری و لجن‌های فاضلاب برخوردار است. ته‌مانده این فرایند می‌تواند به‌عنوان کود آلی مفید به کار رود. همچنین، این فناوری نسبت به تفکیک زباله و خرد کردن آن بسیار حساس است [۳].

4. Gasification
5. Pyrolysis
6. Plasma Gasification

1. Landfill
2. Incineration
3. Anaerobic Digester

الکترونیته می‌شود. الکترون‌ها از میدان الکتریکی مابین دو الکتروود انرژی دریافت می‌کنند و آن را به ذرات سنگین انتقال می‌دهند. سپس گاز یونیده با سرعت به جلو پرتاب و قوس پلازما تشکیل می‌شود [۱۲]. وجود الکترون‌های آزاد عاملی است که امکان دسترسی به دماهای بسیار بالایی (بالتر از ۵۰۰۰ درجه سلسیوس) را فراهم می‌آورد. هر ترکیب شیمیایی جز ضایعات هسته‌ای در این دما بخار می‌شود [۱۳]. مشعل‌ها بر اثر مجاورت با محیط دمابالا باید همواره به وسیله آب‌خنک شوند. حتی با وجود آب‌خنک‌کن، مشعل‌ها به علت خوردگی شدید مرتباً باید تعویض شوند [۱۰].

۳. توصیف فرایند

در فناوری گازسازی پلازما، دما بسیار بالاست و محیط در شرایط کمبود اکسیژن قرار دارد. این دو عامل منجر به تجزیه کامل مواد به مولکول‌های ساده‌تر می‌شود. ترکیبات آلی به گاز سنتز تبدیل می‌شود. گاز سنتز غالباً از هیدروژن و کربن مونواکسید تشکیل شده است. ترکیبات معدنی ذوب و به خاکستری شیشه‌ای^۳ مانند متراکم غیرفعال و غیرقابل نفوذ تبدیل می‌شوند [۱۴]. این فناوری از ۴ مرحله تشکیل شده است: (الف) تفکیک و پیش‌پردازش پسماند؛ (ب) پردازش پسماند درون راکتور گازسازی توسط قوس‌های پلازما و تولید گاز سنتزی؛ (پ) تصفیه و پالایش گاز؛ (ت) تولید انرژی.

۳-۱- مرحله اول: پیش‌پردازش

پسماند قبل از ورود به راکتور جداسازی و تفکیک اولیه (خشک کردن، خرد کردن، تفکیک بر مبنای اندازه، حذف برخی مواد مثل پارچه، شیشه، سنگ و غیره) می‌شود. دستگاه‌های خردکننده، سرند، غربال، سانتریفوژ^۴، جداکننده مغناطیسی و غیرمغناطیسی به کار گرفته می‌شوند تا موادی که با کارایی زیادی پردازش می‌شوند وارد راکتور شوند. این عمل صرفاً برای افزایش عمر راکتور صورت می‌گیرد و به منزله‌ی ضعف عملکردی راکتور نیست. طراحی سیستم تغذیه به‌گونه‌ای است که مواد به داغ‌ترین محل راکتور وارد شوند [۱۱].

برای حذف پسماند و در پی آن تولید انرژی از پسماند است. عملیات حرارتی در این فناوری با احتراق همراه نیست و پسماند در محیط کمبود اکسیژن و نزدیک به شرایط خلأ، در دمای بسیار بالاتر از فرایندهای مرسوم سوزانده می‌شود [۹].

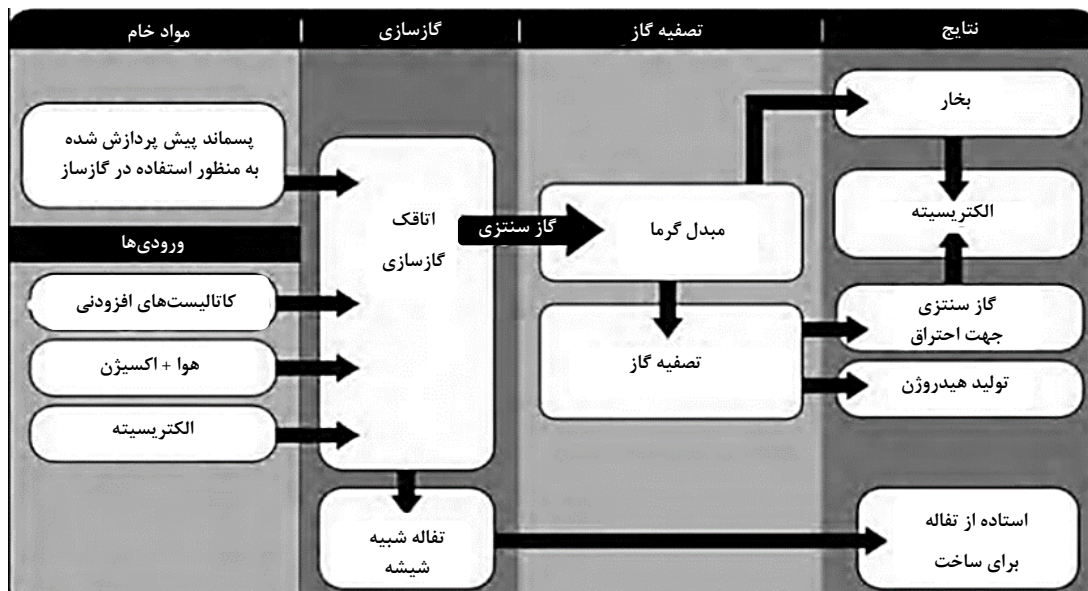
فناوری قوس پلازما اولین بار در سال ۱۹۷۳ توسط دکتر کاماچو معرفی شد. وی نشان داد گاز مفید تولیدشده، از قابلیت تولید انرژی برخوردار است و خاکستر خروجی را نیز می‌توان به‌عنوان مصالح ساختمانی مصرف کرد و نیاز به دفن ندارد. این فرایند در مقایسه با سایر روش‌ها آلاینده کمتری وارد هوا می‌کند. در سال ۱۹۸۸ گروه انرژی پلاسکو در کانادا یک سیستم نمونه از این فناوری را عرضه کرد. در سال ۱۹۹۱ مؤسسه فناوری جورجیا وسیع‌ترین طرح امکان‌سنجی فناوری پلازما را مطالعه کرد. در سال ۱۹۹۲ کاماچو ابداعی برای تبدیل مواد جامد مخلوط به گاز سنتز و خاکستر به ثبت رساند [۱۰]. در اواخر دهه ۱۹۹۰ فناوری گازسازی پلازما برای اولین بار در ژاپن در مقیاس آزمایشگاهی اجرا شد. ورودی این سیستم پسماند جامد شهری، لجن‌ها و فضولات و پسماندهای خردشده بودند [۱۱]. در سال ۲۰۰۲ اکوولی^۱ در کشور ژاپن یکی از اولین مراکز مجهز به فناوری پلازما تأسیس و در سال ۲۰۰۳ راه‌اندازی شد. پس‌از آن در سال ۲۰۰۷ شرکت کانادایی آلتر ان جی آر^۲ فعالیت پلاسمایی خود را آغاز کرد و تا امروز نیز در این زمینه فعالیت‌های گسترده‌اش را ادامه می‌دهد. شرکت‌های دیگری از جمله Tetronic, EuroPlasma, Salono در حال توسعه این فناوری هستند [۱۰]. سیستم پلازما مؤثرترین راه برای تجزیه کامل همه اجزای آلی و غیر آلی به ترکیبات ساده‌تر است.

پلازما، حالت چهارم ماده، گازی یونیده است. مجموعه‌ای از ذرات باردار و خنثی را در نظر بگیرید. برخورد کشسان ذرات خنثی و الکترون‌ها با یکدیگر به تولید پلازما می‌انجامد. در محیط پلازما، ذرات باردار با ذرات همسایه برخورد می‌کنند. علاوه بر این، ذرات تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی متوسط نیز هستند که به حرکت آن‌ها منجر می‌شود. معمولاً این نیرو بیشتر از نیروی برخورد بین ذرات است.

اگر جمعیت ذرات باردار به اندازه کافی باشد، محیط رسانای جریان

3. Vitrified Slag
4. Centrifuge

1. Eco Valley
2. Alter NGR

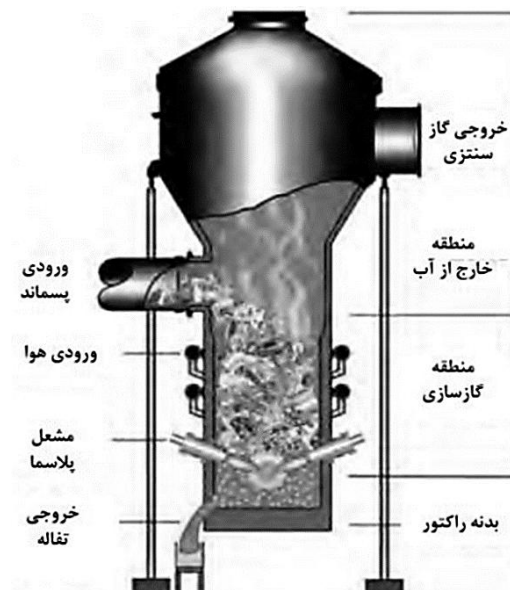


شکل ۱. مراحل تولید محصول در فرایند گازسازی پلاسما [۱۱].

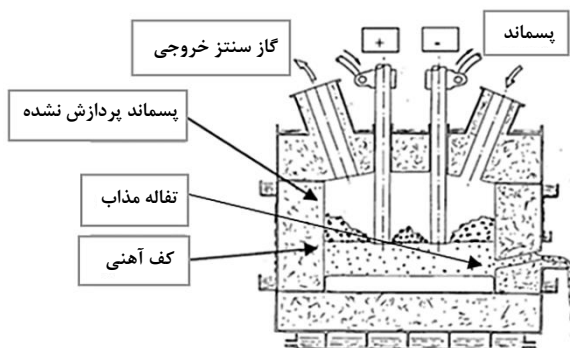
۲-۳ مرحله دوم: گازسازی

این مرحله، هسته اصلی فرایند است. مواد تفکیک شده که در مرحله قبل آماده ورود به راکتور شده‌اند، از قسمت بالای راکتور وارد می‌شوند. آن‌ها تحت حرارت بسیار زیاد تولیدشده توسط مشعل‌ها و در حضور اکسیژن بسیار کم به گاز تبدیل می‌شوند. در صورت وجود مقدار زیاد اکسیژن، فرایند به سمت اکسایش و تولید گازهای حاصل

از اکسایش پیش می‌رود که نامناسب است. در نتیجه، هوا از مکان‌های از پیش تعبیه شده به طور کاملاً کنترل شده وارد می‌شود تا اکسایش رخ ندهد. دلیل اندک اکسیژن داده شده با سیستم، ایجاد احتراق قسمت کوچکی از پسماند است تا حرارت حاصل از احتراق اندک به فرایند گازسازی کمک می‌کند [۱۱].



شکل ۲. طرحواره راکتور تبدیل پسماند به گاز توسط مشعل‌های پلاسمایی / تزریق خوراک از جانب [۱۵].



شکل ۳. طرحواره راکتور تبدیل پسماند به گاز توسط مشعل‌های پلاسمایی / تزریق خوراک از بالا [۱۶].

یکی دیگر از محصولات راکتور، توده شیشه مانندی است که از قسمت انتهایی راکتور خارج می‌شود. برای افزایش پایداری این محصول که در ساخت‌وساز به‌عنوان مصالح مصرف می‌شود، می‌توان به راکتور سنگ‌آهک اضافه کرد، چراکه سنگ‌آهک باعث ایجاد پیوندهای شیمیایی بین مواد معدنی موجود در توده می‌شود. بنابر گزارش‌های رسمی، این محصول کاملاً خنثی است و خطری ندارد، توانایی نفوذ به لایه‌های زمین (و در نتیجه آلوده کردن آب‌های زیرزمینی) را نیز ندارد [۱۰].

۳-۳ مرحله سوم: پالایش گاز خروجی

گاز سنتز تولیدشده می‌تواند حاوی ترکیبات ناخواسته‌ای از جمله خاکستر کربن، فلزات قلیایی، ترکیبات فلزات سنگین، هالوژن‌ها و سولفورها باشد. به همین دلیل، عملیات پالایش ضروری است. قابل توجه است که دستگاه‌های گازسازی در مقایسه با دستگاه‌های احتراقی، اکسیدهای کمتری تولید می‌کنند. از این‌رو گاز خروجی به‌مراتب تمیزتر خواهد بود. بعد از خروج گاز سنتز از بالای راکتور، ابتدا گرمای آن در مجاورت با یک محیط سرد، گرفته می‌شود. سپس با عبور از تجهیزات تصفیه گاز، پاک‌سازی می‌شود [۱۰]. سیکلون‌ها^۱ و الکتروصفایی‌ها^۲ تجهیزاتی‌اند که در صنعت مصرف فراوان دارند و طراحی آن‌ها نسبتاً آسان است. مبنای کار سیکلون جدا کردن ذرات جامد ناشی از سنگین‌تر بودن نسبت به ذرات گاز است. الکتروصفایی‌ها نیز دارای صفحاتی‌اند که میدان مغناطیسی برقرار می‌کنند و ذرات، بسته به نوع بار صفحات به سمت آنها ریزد می‌شوند، این در حالی است که مولکول‌های گاز سنتز خنثی هستند و بدون انحراف به مسیر خود ادامه می‌دهند. برای مواد معلق به‌جامانده نیز تمهیداتی باید اندیشیده شود. معمولاً سامانه‌های گازشوی^۳ مرطوب از قابلیت جذب و حذف مواد آلی و گازهای اسیدی برخوردار است. کنترل پی‌اچ^۴ در گازشوی مرطوب با تزریق سود سوزآور یا آهک انجام می‌شود. سرانجام، گاز خروجی از گازشوی مرطوب باید خشک و رطوبت آن گرفته شود تا برای تولید انرژی به‌کار آید [۱۱].

1. Cyclone
2. Electro Filter
3. Scrubber
4. PH

مطابق شکل (۲)، هوا از نواحی پایین‌تر از ورودی خوراک وارد می‌شود. گاز به بالا و خوراک به پایین می‌روند و در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند. مشعل‌های پلاسما می‌توانند دمایی حدود ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ درجه سلسیوس ایجاد کنند. معمولاً گازسازی در دمای ۱۵۰۰ درجه سلسیوس انجام می‌شود. مجاورت گاز و پسماند و دمای بالا باعث می‌شود که ۸۰ الی ۹۰ درصد کربن ورودی به گاز سنتز تبدیل شود. نکته قابل‌توجه از این قرار است که مشعل‌ها در پایین‌ترین منطقه راکتور قرار دارند، پس گاز سنتز تولیدشده هنگام انتقال به بالا مجبور است از لایه پسماند جدیدی که وارد راکتور شده است، عبور کند. این لایه پسماند "رویه سرد" نام دارد و نقش یک پالایه را دارد که مانع از عبور ذرات بزرگ مثل فلزات سنگین می‌شود [۱۶].

ترکیب گاز سنتز وابسته به ترکیب خوراک ورودی است. گاز سنتز شامل ۷۰٪ هیدروژن و کربن مونواکسید است. ۳۰٪ دیگر، نیتروژن و کربن دی‌اکسید است. کلر موجود به اسیدکلریدریک، و گوگرد به هیدروژن سولفید تبدیل می‌شود. این گاز دارای انرژی گرمایی بسیار زیادی است که از آن می‌توان برای تولید گرما و الکتریسیته استفاده کرد. همچنین، به‌عنوان ماده اولیه صنایع نیز مصرف می‌شود. در جدول (۱) واکنش‌های بین کربن موجود در پسماند جامد با گازهای حاضر در محیط درج شده‌اند. در جدول (۲) واکنش‌های موجود در راکتور با یکدیگر درج شده است.

جدول ۱. واکنش‌های گاز جامد [۱۶].

نام واکنش	گرمای واکنش (J/mol)	واکنش
احتراق	+۳۹۳۷۹۰	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
هیدرو-گازسازی	+۷۴۹۰۰	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$
بخار-کربن	-۱۷۷۴۰۰	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
مرزی	-۱۷۲۵۸۰	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$

جدول ۲. واکنش‌های فاز گازی [۱۶].

نام واکنش	گرمای واکنش (J/mol)	واکنش
انتقال آب-گاز	+۲۸۵۳	$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$
متان‌زایی	+۲۵۰۳۴۰	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$

۲-۴ مرحله چهارم: تولید انرژی

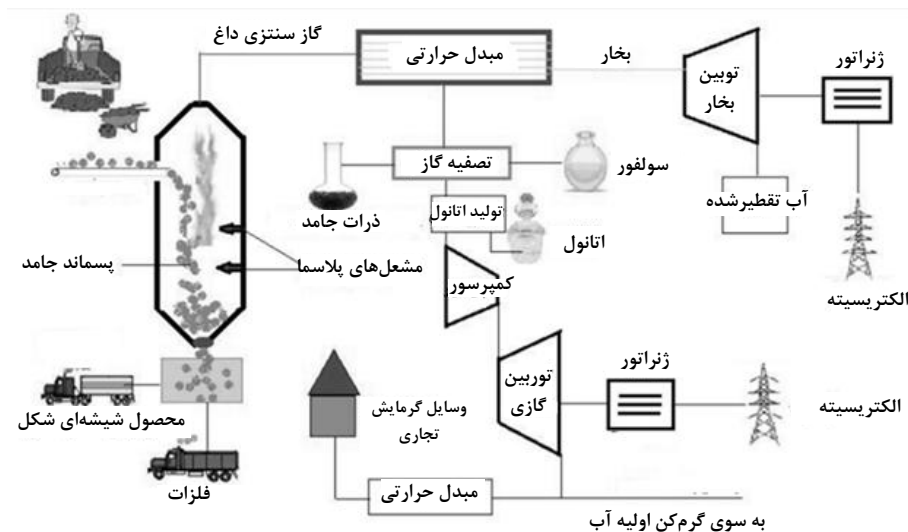
گاز سنتز تولیدشده، شامل هیدروژن، کربن مونوکسید، نیتروژن و مقادیر کمی متان و استیلن و اتیلن، منبع مناسبی برای تولید انرژی است. این گازها در دستگاه‌های تولید انرژی سوزانده می‌شوند و انرژی آزادشده را برای تولید الکتریسیته به مصرف می‌رسانند. از جمله روش‌های دستیابی به جریان برق می‌توان از دیگ‌های بخار، توربین‌های بخار و توربین‌های گازی نام برد. باید توجه داشت که توربین به گاز تمیز با آلودگی پایین نیاز دارد، درحالی‌که دیگ بخار می‌تواند از گاز آلوده نیز استفاده کند و در مقایسه با سایر گزینه‌ها، هزینه آن کمتر است. سرانجام، محصولات اکسایش گاز سنتز، به شکل کربن دی‌اکسید، نیتروژن و بخار آب وارد جو می‌شوند. گازهای رهاشده در جو آلاینده نیستند و اثر گلخانه‌ای ندارند. جز تولید الکتریسیته، می‌توان به انواع سوخت‌های مایع از جمله اتیلن و متانول به‌عنوان محصول فرعی دست‌یافت [۱۰].

در شکل (۴) فرایند کلی یک واحد امحاء زباله با فناوری پلاسما را مشاهده می‌کنید. پسماند جامد وارد راکتور می‌شود، در مجاورت مشعل‌های پلاسما به گاز تبدیل، گاز سنتزی از یک مبدل حرارتی عبور داده می‌شود تا دمای آن کاهش یابد. بخار تولید شده از این مرحله وارد توربین بخار می‌شود و الکتریسیته تولید می‌کند. اینک گاز سنتز سرد شده را به مرحله تصفیه وارد می‌کنند. ذرات جامد و نامطلوب آن جدا می‌شود. خروجی از این مرحله می‌تواند وارد مرحله

تولید اتانول شود. اتانول جدا شده و سایر گازها وارد توربین گازی می‌شوند تا الکتریسیته تولید کنند. پسماند جامد خروجی از پایین راکتور نیز به عنوان محصول به فروش می‌رسند [۱۷].

۴. فرایند پلاسما دو مرحله‌ای

دستگاه‌های حذف زباله بر مبنای قوس پلاسما، شارگرمای زیادی تولید می‌کند که به کاهش حجم مواد ورودی و غیر فعال‌سازی آلودگی‌های معدنی و تولید انرژی می‌انجامد. این فرایند می‌تواند در آرایش‌های یک یا دو مرحله‌ای اجرا شود. در آرایش یک مرحله‌ای، انرژی موردنیاز فقط برای تجزیه از پلاسما تأمین می‌شود. آرایش‌های دو مرحله‌ای پیچیده‌ترند. مرحله اول یک گازساز رایج در صنایع است و در مرحله دوم از قوس پلاسما استفاده می‌شود. شرکت پلاسکو انرژی در کانادا و ای پی پی^۱ در انگلیس در این فناوری پیشتازند. استفاده از دو مرحله، ظرفیت پذیرش خوراک را بالا می‌برد. همچنین، گفته شده کنترل ترکیبات آلی فرار و قیر موجود در گاز سنتز نیز ارتقاء یافته است. به‌طور کلی، تولید گاز در فرایند یک مرحله‌ای به انرژی الکتریکی بیشتری نیاز دارد. فرایند یک مرحله‌ای برای حجم کم پسماندهایی که پردازش آن‌ها دشوار است (از جمله زباله‌های بیمارستانی و خطرناک) مناسب‌تر است و فرایند دو مرحله‌ای برای جریان‌های ورودی با دبی زیاد مناسب‌تر است.



شکل ۴. دیاگرام کلی فرایند [۱۷].

راکتور دارای دمای ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سلسیوس است و ترکیبات عمده آن H_2 ، CO و CO_2 هستند [۱۸]. سپس گاز سنتزی از ۱۲۰۰ درجه سلسیوس تا ۴۰۰ درجه سلسیوس سرد می‌شود (گرما برای تولید بخار در دیگ بخار به کار گرفته می‌شود که بخشی از بخار آب تولیدی در همین سامانه مصرف می‌شود و بخش دیگر آن برای تولید برق مصرف می‌شود). یک توربین بخار می‌تواند به ازای هر تن پسماند جامد شهری ۵۰۰ تا ۶۰۰ کیلووات ساعت انرژی تولید کند [۱۷].

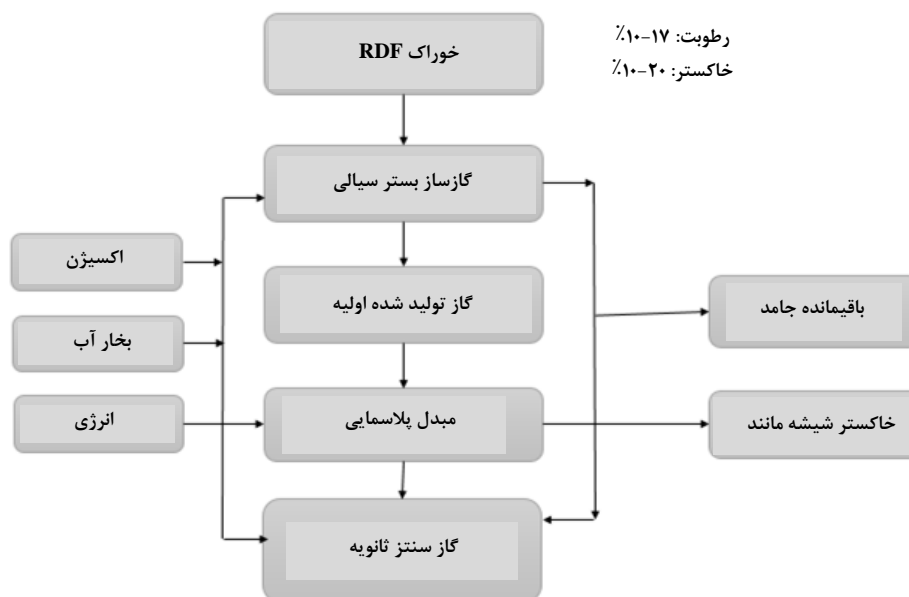
سپس گاز سنتزی وارد بخش پاک‌سازی گاز می‌شود تا ذرات جامد، گازهای اسیدی و بخارهای فلزی حذف شوند. این سامانه دارای یک صافی خشک و یک گازشوی مرطوب نیز هست. گاز سنتزی تمیز با ارزش حرارتی 10 MJ/NM^3 تا 14 MJ/NM^3 قبل از استفاده در تولید انرژی رطوبت‌زدایی می‌شود [۱۸].

۵. حوزه‌های اقتصادی

- تأسیسات گازسازی، با توجه به مقدار و نوع پسماندی که دریافت می‌دارند هزینه‌ای را نیز از تولیدکننده پسماند دریافت می‌کنند.
- انرژی تولیدشده و گازهای خروجی و خاکستر مذاب نیز به فروش می‌رسند.

فرایند دومرحله‌ای که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، و گروه ای پی پی آن را طراحی کرده و ساخته، دارای دو مرحله کلیدی است: گازساز بستریالی و مبدل پلاسمایی. مراحل دیگر که شامل آماده‌سازی سوخت، پاک‌سازی گاز و تولید انرژی است، قبلاً به طور کامل تشریح شده‌اند. فرایندهای وابسته به دما دارای فشار منفی اندک‌اند.

زباله‌های شهری یا صنعتی عمل‌آوری نشده، ابتدا به صورت مکانیکی همگن و رطوبت آن‌ها گرفته می‌شود. اگر برای این آماده‌سازی از فرایند آر دی اف^۱ استفاده شود، برای ورودی حدود ۱۵۰ هزار تن زباله می‌توان به ۹۰ هزار تن خروجی با رطوبت ۱۰ تا ۱۷ درصد و مقدار خاکستر ۱۰ تا ۲۰ درصد دست‌یافت. خروجی از آر دی اف به یک گازساز بستریالی حیابی وارد می‌شود. جریان گازی بخار و اکسیژن علاوه بر سیالی کردن مواد، به انجام واکنش‌های گازسازی نیز کمک می‌کند. دمای بستر ۸۵۰ درجه سلسیوس است. گاز سنتزی از بالای بستر خارج و به مبدل پلاسمایی وارد می‌شود. طراحی سانتریفوژی این مبدل به حذف ذرات جامد از گاز سنتز کمک می‌کند. حرارت زیاد و تابش نور فرابنفش از الکترودها منجر به شکستن ترکیبات آلی پیچیده می‌شود. البته مقدار کمی اکسیژن و بخار آب نیز به سیستم تزریق می‌شود. درعین حال، ترکیبات معدنی و خاکستر در لایه مذاب انتهای راکتور باقی می‌مانند. گاز خروجی از



شکل ۵. فرایند APP، مراحل اصلی و پارامترهای عملیاتی [۱۸].

1. Refused Derive Fuel (RDF)

جدول ۳. هزینه‌های یک واحد صنعتی [۱۸].

اقتصاد سالیانه یک واحد صنعتی در هند با سرمایه اولیه ۱۵۰ میلیون دلار		درآمد به دلار	
مخارج به دلار		درآمد به دلار	
۹,۸۲۸,۳۳۰	هزینه عملیاتی	تولید برق	۱۳,۲۳۰,۰۰۰
		دستمزد	۹,۱۸۷,۵۰۰
۱۴,۴۰۷,۲۲۵	پرداخت اقساط	فروش محصولات بازیابی شده	۸,۵۶۸,۳۷۵
		فروش ته‌ماند شیشه‌های	۳۱۵,۰۰۰
۰	مالیات	فروش گوگرد و هیدروکلریدریک اسید	۱,۷۵۰
۲۴,۲۳۵,۵۵۵	مجموع	مجموع	۳۱,۳۰۲,۶۲۵

جریان نقدینگی سالانه: ۷۰,۰۶۷,۰۷۰ دلار

۶. نتیجه‌گیری کلی

امروزه استفاده از روش‌های نو برای تولید انرژی و درعین حال حذف آلودگی‌ها از پسماندهای روزافزون، اجتناب‌ناپذیر است. گازسازی پلاسمایی از جدیدترین و قدرتمندترین روش‌ها به‌شمار می‌آید که البته به سرمایه‌گذاری اولیه گزافی نیاز دارد. اما این سرمایه‌گذاری در مدت‌زمان کوتاهی (حدود دو سال) بازخواهد گشت که این روش را بسیار پرسود می‌سازد. دمای پردازش بسیار بالاست و از قابلیت حذف پسماندهای دردسرساز سمی و آلوده یا مقاوم نیز برخوردار است. برای تولید این دمای بالا از مشعل‌های پلاسمای بهره می‌گیرند که خوردگی و آسیب‌پذیری آن‌ها باید در نظر گرفته شود و نیاز به تعمیرات و تعویض پیوسته دارند. علیرغم قابلیت شکستن همه مواد (البته جز زباله‌های هسته‌ای)، بهتر است بعضی مواد از پسماند ورودی تفکیک و پردازش شود تا آسیب به راکتور کاهش یابد و بازده عمل بالا رود. گاز سنتز تولیدشده (شامل هیدروژن، کربن مونواکسید، نیتروژن و کربن دی‌اکسید) قابلیت تولید الکتریسیته دارد. این گاز می‌تواند به‌عنوان ماده اولیه صنایع مصرف شود. در قسمت‌های مختلف فرایند حرارت تولید می‌شود که بهتر است بازیابی شود. طراحی دومرحله‌ای شامل یک گازساز و سپس یک مبدل پلاسمایی است، ظرفیت پذیرش خوراک بیشتری دارد. گازسازی پلاسمایی برای تبدیل پسماند به انرژی، مطرح و در حال رشد است. این طراحی در کشورهای پیشرفته از جمله آمریکا، کانادا و ژاپن در حال استفاده و گسترش است.

انتخاب طرح مناسب به عوامل سرمایه‌گذاری اولیه، بازده، هزینه‌های تعمیر و نگهداری، بازیافت انرژی، نوع و حجم خوراک ورودی و جز آنها بستگی دارد. با توجه به این‌که مقدار و ترکیب پسماند در روزهای مختلف هفته و نیز در ماه‌ها و فصلهای سال تا حدودی تغییر می‌کند، طراحی باید برای سازگاری با این تغییرات از انعطاف‌پذیری لازم برخوردار باشد. هدف از طراحی گازساز پلاسمایی تولید گاز سنتز و برگرفتن انرژی از آن است [۱۰]. توجه شود که علاوه بر گاز سنتز تولیدشده، اجزای دیگری نیز وجود دارند که گرفتن انرژی از آن‌ها امکانپذیر است:

- گاز حاصل از احتراق گازهای قابل اشتعال
- گرمای محسوس گازناشی از دمای گازهای تولید شده
- گرمای محسوس ناشی از دمای آب در آب خنک‌کننده مشعل
- گرمای محسوس ناشی از دمای آب در آب گازشوی مرطوب [۱۱]

هر بخش سامانه می‌تواند حاوی یک چرخه بازیافت انرژی باشد. نکته حائز اهمیت دیگر، انرژی الکتریکی لازم به ازای هر تن زباله خام است که به ترکیب شیمیایی پسماند بستگی دارد، به‌هرحال، باید با تغییر مقدار پسماند و یا عملیات پیش‌پردازشی، از جمله خشک‌کردن، مشعل‌هایی با قدرت حداقل ۵۰۰ کیلووات و حداکثر ۱۰ مگاوات به‌کار گرفته شوند [۱۰].

بهتر است مواد قابل بازیافت از جریان ورودی جدا شوند. مثلاً، ارزش نوع خاصی پلاستیک در آمریکا ۳۰۰ دلار به ازای هر تن و یا ارزش کاغذ معادل ۷۵ دلار به ازای هر تن است. درحالی‌که هر تن زباله حدود ۰/۸ مگاوات برق تولید می‌کند که ارزش آن معادل ۷۰ دلار است. از این‌رو تفکیک این مواد و بازیافت آن‌ها از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر است. به این نکته هم باید توجه کرد که هرچند برخی مواد از جمله فلزات و شیشه‌ها در دماهای بالا شکستنی‌اند، ولی هزینه انرژی‌ای که صرف شکستن آن‌ها می‌شود بیشتر از انرژی تولیدشده توسط آن‌هاست. پس بهتر است وارد راکتور نشوند، چراکه در صورت ورود این مواد بازده کلی کاهش می‌یابد [۱۳].

در جدول (۳) هزینه‌ها و درآمد یک واحد گازساز پلاسمایی درج شده است.

- [۱] افتخار، ل.، "ضرورت توجه به توسعه پایدار در مدیریت پسماندهای جامد شهری در ایران"، نخستین همایش توسعه شهری پایدار، تهران، قطب علمی توسعه شهری پایدار، (۱۳۸۹).
- [2] Sanlisoy, A., Carpinlioglu, MO., "A review on plasma gasification for solid waste disposal", *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 2, 1361–1365, (2017).
- [۳] نصیری، ج.، "بررسی و مقایسه فناوری‌های تولید برق از پسماندهای جامد شهری"، سومین همایش ملی مدیریت پسماند، تهران، سازمان شهرداری‌ها و دهرداری‌های کشور، سازمان حفاظت محیط‌زیست، (۱۳۸۶).
- [4] Worrell, W. A., Vesilind, P. A. "Solid Waste Engineering", 2nd Edition, (2012).
- [5] Minutillo, M., Perna, A., Di Bona D., "Modelling and performance analysis of an integrated plasma gasification combined cycle (IPGCC) power plant", *Energy Conversion and Management* 50, 2837–2842, (2009).
- [6] Gandhi, H., "Plasma Gasification: From a Dirty City to a Heavenly Place and from Waste Solids to Clean Fuel", *International journal for innovative research in science and technology*, Volume 1, issue 11, (2015).
- [7] Belgiorno, V., De Feo, G., Della Rocca, C., Napoli, R. M. A., "Energy from gasification of solid wastes". *Waste Management*, 23, 1–15, (2003).
- [8] Chen, D., Yin, L., Wang, H., He, P., "Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review". *Waste Management*, 34, 2466–2486, (2014).
- [9] Rajasekhar, M., Venkat Rao, N., Chinna Rao, G., Priyadarshini, G., Jeevan Kumar, N., "Energy Generation from Municipal Solid Waste by Innovative Technologies – Plasma Gasification", *Procedia Materials Science*, 10, 513 – 518, (2015).
- [۱۰] بالی، ع.، عباسی، م.، مجیدی، ل.، "بررسی روش تبدیل پسماند به گاز توسط پلاسما به‌منظور دفع پسماندهای جامد شهری". اولین کنفرانس ملی علوم و مدیریت محیط‌زیست، اردبیل، موسسه حامیان زیست‌اندیش محیط‌آرمانی، (۱۳۹۴).
- [۱۱] ولی‌اللهی، س.، عبدلی، ا.، "امحای زباله به‌وسیله قوس پلاسما"، اولین همایش تخصصی مهندسی محیط‌زیست، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط‌زیست، (۱۳۸۵).
- [12] Blahos, L., "Plasma physics, the fourth state of matter", Giolas (Ed.), *Introduction Terms*, Salonica, 1–12, (2000).
- [13] Dodge, E., "Plasma gasification: Clean renewable fuel through vaporization of waste", Cornell University, (2008).
- [14] Galeno, G., Minutillo, M., Pera, A., "From waste to electricity through integrated plasma Gasification/fuel cell (IPGFC) system", *International journal of Hydrogen energy*, 36, 6921701, (2011).
- [۱۵] محمدیان پورطالاری، ع.، "بررسی فرایندهای گازسازی و دفع پسماند با استفاده از راکتورهای زباله سوز پلاسما". دومین همایش ملی انرژی‌های پاک و نو، (۱۳۸۵).
- [16] Moustakas, K., Fatta, D., Malamis, S., Haralambous, K., Loizidou, M., "Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment", *Journal of Hazardous Materials*, B123, 120–126, (2005).
- [17] Ojha, A., Reuben, A. C., Sharma, D., "Solid Waste Management in Developing Countries through plasma Arc Gasification- an Alternative Approach", *APCBEE Procedia* 1, 193 – 198, (2012).
- [18] Morrin, S., Lettieri, P., Chapman, C., Mazzei, L., "Two stage fluid bed plasma gasification process for solid waste valorization: technical review and preliminary thermodynamics modelling of sulfur emission". *Waste Management*, 32, 676–684, (2012).