

بررسی کاربرد رسوب دهنده‌های الکترواستاتیکی جهت پالایش گاز خروجی کارخانه‌های سیمان و نحوه بهبود عملکرد آن

مجید ریاحی سامانی^۱ میترا ریاحی سامانی^۲

۱-عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۲-دبیر شیمی، آموزش و پرورش ناحیه ۱ شهرستان شهرکرد

E-mail:m.riahisamani@yahoo.com

خلاصه

رسوب دهنده‌های الکترواستاتیکی جهت تمیز کردن گاز خروجی کارخانه‌های سیمان به طور وسیع استفاده می‌شوند در این مقاله به بررسی عملکرد این رسوب دهنده‌ها پرداخته شده است. از عوامل مؤثر بر عملکرد این رسوب دهنده‌ها خواص ذرات انتشار یافته کمیته گاز، دمای گاز خروجی، نقطه شبنم، غلظت ذرات موجود در گاز و اندازه ذرات می‌باشد که در واحدهای مختلف نظیر کوره، آسیاب مواد خام، خنک‌کننده کلینکر، آسیاب سیمان و ... این خواص متفاوت خواهند بود. مهمترین فرمول مورد استفاده برای رسوب دهنده‌های الکترواستاتیکی معادله دوش (Detoush) می‌باشد. سرعت حرکت ذرات به طور مستقیم به اندازه ذرات و به مربع ولتاژ و به جذر دمای مطلق ارتباط مستقیم دارد. در ادامه افزایش راندمان رسوب دهنده‌های الکترواستاتیکی مورد بررسی قرار گرفته شده و روشهایی برای بهبود عملکرد این رسوب دهنده‌ها بیان شده است که عبارتند از ۱- حالت دهی گاز ۲- انرژی دادن پالسی (Pulse Energisation) ۳- ترکیب رسوب دهنده‌های الکترواستاتیکی و فیلتر کیسه‌ای. حالت دهی گاز هزینه زیادی به دنبال دارد، انرژی دادن پالسی راندمان بالایی دارد و تغییرات دما تاثیر کمی روی راندمان عملکرد آن دارد. ترکیب رسوب دهنده‌های الکترواستاتیکی و فیلتر کیسه‌ای برای کارخانه‌های با ظرفیت بالا که سطح رسوب دهنده‌های الکترواستاتیکی زیادی می‌خواهند توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: رسوب دهنده الکترو استاتیکی-آلودگی هوا-کارخانه سیمان-ذرات

مقدمه

در کارخانه سیمان مواد آهکی و مواد رسی را در تحت شرایط خشک با هم مخلوط کرده و سیمان تولید می‌کنند که شامل مراحل مختلفی نظیر پیش حرارتی دهی، کلنیکرسازی، خنک کردن کلینکر، عملیات خرد کردن و انبار کردن می‌باشد [۱]. در هر مرحله گاز و گرد و غبار زیادی تولید می‌شود این ذرات از نظر خواصی نظیر دما، رطوبت، قطر ذرات، ترکیبات شیمیایی و ... متفاوت خواهند بود فیلترهای کیسه‌ای و رسوب دهنده‌های الکترو استاتیکی بیشترین کاربرد را در کارخانه‌های سیمان دارند هر چند که در بعضی جاها از رسوب دهنده‌های وزنی و سیکون‌ها هم استفاده شده است. رسوب دهنده‌های الکترواستاتیکی می‌توانند مقادیر زیادی گاز (۲۵ تا ۱۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه) را تصفیه نمایند و علاوه بر این افت فشار اندکی در سیستم ایجاد می‌کنند [۲].

نحوه عملکرد رسوب دهنده‌های الکترواستاتیکی:

مباحث تئوریک

نحوه عملکرد رسوب دهنده‌های الکترواستاتیکی در شکل ۱ دیده می‌شود رسوب دهنده‌های الکترواستاتیکیهای موجود در صنعت از الکترودهای تخلیه بار منفی با ولتاژ بالا (بالای ۵۰ KV-) که بین الکترودهای جمع کننده زمین قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. الکترودهای تخلیه معمولی به صورت مفتول یا میله است و الکترودهای جمع کننده به صورت صفحه‌های طولی عمودی هستند. میدان پر ولتاژ ملکول‌های گاز را در جریان هوا یونیزه می‌کند و به آنها بار منفی می‌دهد این گازها دور ذرات جمع شده و آنها را باردار می‌کند [۳]. بر اثر میدان الکتریکی منفی، ذرات دارای بار منفی حرکت کرده و ذرات در الکترودها جمع‌آوری می‌شوند. [۴].

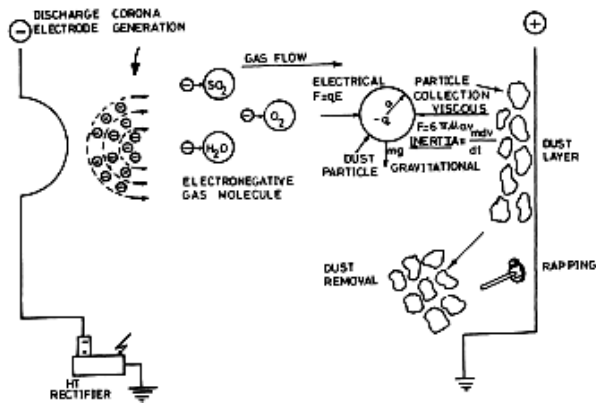
عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر -

دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

E-mail:m.riahisamani@yahoo.com

Tel: ۰۳۱۲۳۲۶۰۰۱۱-۱۴ Fax: ۰۳۱۲۳۲۶۰۰۸۸

دبیر شیمی، آموزش و پرورش ناحیه ۱ شهرستان شهرکرد -^۲



شکل ۱ - نحوه عملکرد رسوب دهنده الکترواستاتیکی

در کلیه مباحث آنالیزی برای راندمان رسوب دهنده های الکترواستاتیکی از فرمول دوش، $(۴-۵)$ استفاده شده است که در این فرمول:

$$\eta = 1 - \exp\left[\frac{-Ave}{Q}\right] \quad (۱)$$

که در آن A سطح جمع کننده بر حسب m^2 ، ve سرعت حرکت ذره بر حسب $\frac{m}{s}$ ، Q دبی گاز بر حسب $\frac{m^3}{s}$ و η راندمان عملکرد الکتروفیلتر می باشد از فرمول پیدا است که با افزایش سرعت ذره η افزایش می یابد. معادله سرعت ذره طبق معادله زیر است.

$$ve = \frac{qEC}{3\pi\mu D\rho} \quad (۲)$$

که در آن q بار الکتریکی ذره بر حسب کولن، E شدن میدان الکتریکی بر حسب $\frac{V}{m}$ ، c ضریب تصحیح بدون واحد، μ ویسکوزیته گاز بر حسب $\frac{kg}{m-s}$ و $D\rho$ قطر ذره بر حسب متر می باشد برای ذرات بزرگتر از 1μ بر ذره از فرمول زیر حساب می شود.

$$q = \left[\frac{3k}{k+2}\right] \pi \epsilon E D\rho^2 \quad (۳)$$

در این فرمول k ثابت دی الکتریک و بدون بعد و ϵ قابلیت گذردهی خلاء است و واحد آن $\frac{c}{m.v}$ است حال با تلفیق معادله ۲ و ۳ داریم سرعت حرکت ذره از فرمول

زیر حساب می شود.

$$ve = \left[\frac{k}{k+2}\right] \left[\frac{4E^2 c}{\mu}\right] D\rho \quad (۴)$$

طبق این معادله ve متناسب با $D\rho$ و بقیه پارامترها ثابت هستند لذا برای ذرات با قطر بالای یک میکرون با افزایش قطر ذره سرعت حرکت ذره به سمت الکتروود زیادتر می شود و راندمان عمل بالاتر می رود و می توان نشان داد که طبق معادله ۴ تغییرات ve با دما به ثابت c و ویسکوزیته گاز ارتباط دارد (تغییرات ثابت دی الکتریک نیاز به بررسی نیست چرا که صورت و مخرج کسر ساده می شود).
با تغییر c و μ با دما تغییر می کند رابطه تغییرات ویسکوزیته گاز و دما طبق رابطه زیر بیان شده است.

$$\mu \propto T^{\frac{1}{2}} = c_1 T^{\frac{1}{2}} \quad (۵)$$

که در این رابطه T دمای مطلق گاز بر حسب کلون، c_1 ثابت تناسب بر حسب $\frac{gk}{Msk^2}$ ، c طبق رابطه فلاگان (Flagan) بیان شده و داریم.

$$c = 1 + c_2 = \left[\frac{2\lambda}{D\rho}\right] \quad (۶)$$

λ فاصله آزاد متوسط بین ملکول های گاز و c_2 ثابت بدون بعد است، λ به طور مستقیم متناسب با دما است و داریم.

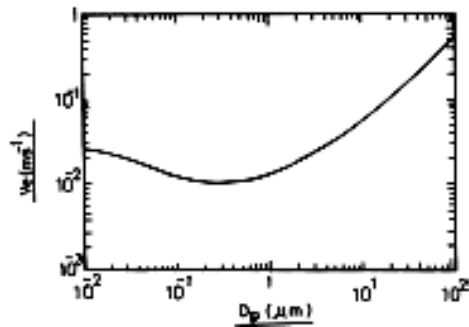
$$c \propto T = c_3 T \quad (۷)$$

$$C_3 \text{ ثابت تناسب است و واحد آن } \frac{m}{sk^2} \text{ می باشد}$$

طبق این معادله دیده می شود که سرعت حرکت ذره با جذر دمای مطلق رابطه مستقیم دارد ولی این در عمل دیده نمی شود و بر عکس با بالا رفتن دمای گاز راندمان کاهش می یابد که دلیل این قضیه بالا رفتن مقاومت ویژه ذرات با دما است وقتی که مقاومت ویژه ذرات به بالای $10^{10} \Omega$ می رود پتانسیل داخل لایه های ذره افزایش یافته و ولتاژ مؤثر در سرتاسر رسوب دهنده های الکترواستاتیکی کاهش می یابد [۴]. لذا راندمان عملکرد رسوب دهنده های الکترواستاتیکی کاهش می یابد پس بهتر است بگوئیم طبق معادله ۴ سرعت حرکت ذره متناسب با مربع پتانسیل الکتریکی می باشد.

تأثیر خواص گاز خروجی اندازه ذرات

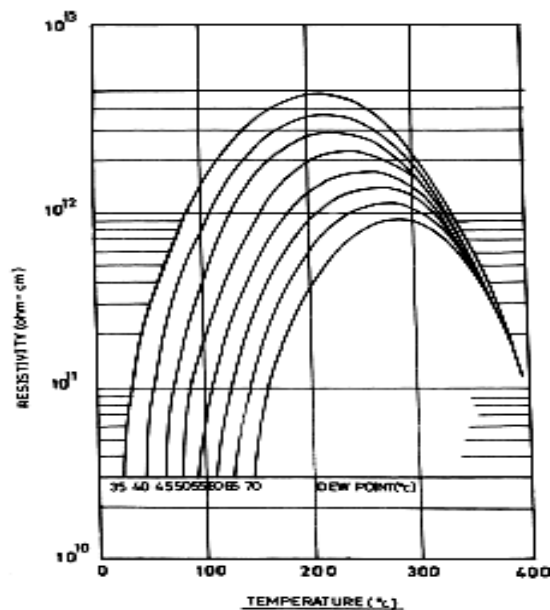
همانطور که در معادله ۱ بیان شد راندمان عملکرد رسوب دهنده های الکترواستاتیکی به اندازه ذرات بستگی دارد و طبق شکل ۲ تغییرات سرعت ذره با قطره ذره را نشان می دهد. طبق منحنی سرعت حرکت ذرات نسبتاً بزرگ و نسبتاً کوچک بالاست چراکه در ذرات ریز هرچند بار کمی دارند ولی قابلیت حرکت ذره بالاست و در ذرات بزرگ بار قابل توجهی دریافت می شود و با بزرگ شدن قطر، در نیروی استوکس ثابت درآگ متناسب با $D\rho$ زیاد می شود ولی نیروی الکتریکی با $D\rho^2$ نسبت دارد لذا سرعت حرکت ذره بهبود می یابد [۴].



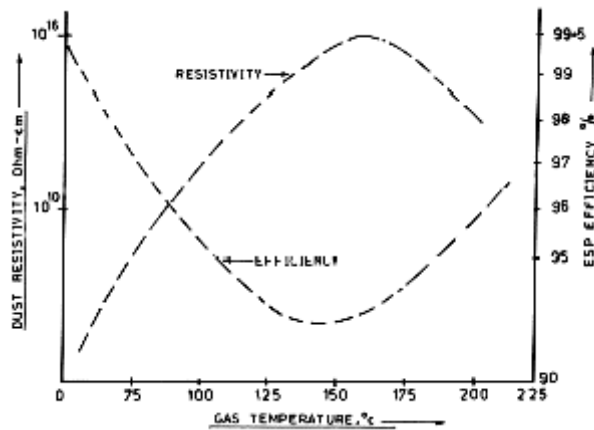
شکل ۲ - تغییرات سرعت حرکت ذره با قطر ذره

تأثیر دما و رطوبت گاز

با تغییرات دما، مقاومت ویژه ذرات تغییر می کند [۴]. در شکل ۳ تغییرات مقاومت ویژه ذرات را با تغییرات دما و رطوبت برای ذرات خروجی از یک کارخانه سیمان در هندوستان مشاهده می کنید. دلیل این قضیه این است که در دمای $100^\circ C$ لایه های غبار از یک لایه نازک رطوبت پوشیده شده اند و این رطوبت قلیانیت محلول دارد و لذا الکتریسته از سطح ذرات هدایت می شود. بعد با افزایش دما رطوبت بخار می شود در دمای بالای 100 درجه با افزایش دما ظرفیت قلیایی کم می شود و یک افزایش تدریجی در مقاومت ویژه ذرات داریم و در دمای 150 درجه سلیوس سطح ذرات کاملاً خشک شده و عبور الکتریسته از داخل ذرات شروع می شود، با افزایش دما از این مقدار، هدایت پذیری هسته زیادتر شده و مقاومت ویژه کم می شود. مقاومت ویژه ذرات رسوب شده روی الکتروود مثبت نیز از عوامل مؤثر بر عملکرد الکترو فیلتر می باشد [۱]. شکل ۴ تغییرات راندمان عملکرد الکترو فیلتر را با تغییرات مقاومت ویژه ذرات نشان می دهد



شکل ۳ - تغییرات مقاومت ویژه ذرات با رطوبت (نقطه شبنم) و دما برای ذرات خروجی از یک کارخانه سیمان در هندوستان



شکل ۴- تغییرات راندمان رسوب دهنده با مقاومت ویژه

روش های بهبود عملکرد رسوب دهنده های الکترواستاتیکی

همانطور که اشاره شد رسوب دهنده های الکترواستاتیکی به طور وسیعی در کارخانه های سیمان کاربرد دارد و جهت تمیز کردن گاز قسمت های مختلف کارایی قابل قبولی دارد و البته جای اصلاح نیز دارد که در زیر چندین روش برای بهبود عملکرد کارخانه سیمان ارائه شده است

حالت دهی گاز

در قبل بیان کردیم که چگونه دمای گاز و مقاومت ویژه بر عملکرد رسوب دهنده های الکترواستاتیکی اثر می گذارند. حالت دهی هوا ابزاری برای پائین آوردن مقاومت ویژه ذرات می باشد که یکی و یا ترکیبی از حالت های زیر به این منظور به کار می رود.

۱- کاهش دمای گاز

۲- افزایش رطوبت گاز

۳- رقیق سازی گاز با هوای خنک

۴- افزایش غلظت ترکیبات هیدروفیلی نظیر K_2SO_4 در گاز

درصد رطوبت گاز، در شکلی نظیر شکل ۵ که به برج حالت دهی معروف است زیاد می شود و گاز از بالا وارد و از پایین خارج می شود و آب به صورت قطرات بسیار ریز به گرد و غبار پاشیده می شود و در حین آب پاشی، آب دمای ذرات را گرفته و آب بخار می شود و بنابراین هوا خنک شده و درصد رطوبت آن نیز زیاد می شود. و باید مقدار آب کنترل شود که همه آب بخار شود و چیزی به پایین نرسد و مقدار آب با کنترل دمای گاز خروجی کم و زیاد می شود به عنوان مثال در گاز خروجی از کوره دوار دما از ۳۳۰-۲۸۰ درجه سلسیوس به ۱۵۰ درجه سلسیوس سقوط می کند و نقطه شبنم از ۴۰ °C به ۶۰ °C می رسد [۴]. این روش یکسری معایبی دارد که به شرح زیر است:

۱- گاز خنک شده (۱۵۰ °C) نمی تواند برای گرم کردن قسمت های دیگر مصرف شود.

۲- قیمت بالای الکتریسیته و آب

۳- کیفیت آب تأثیر گذار است.

۴- نیازمندی های دیگر و غیراعتماد بودن سیستم

یکی دیگر از روش های حالت دهی گاز افزایش ترکیبات هیدروفیلی نظیر K_2SO_4 است افزایش مقدار کمی K_2SO_4 به طور قابل قبولی نیاز به آب را در برج حالت دهی کم می کند می توان تأثیر مواد جدید بر عملکرد این حالت را بررسی کرد. [۴]

انرژی دادن پالسی یا رسوب دهنده های الکترواستاتیکی گرم

در حالت قبل دیدیم که برای حالت دهی باید هزینه زیادی مصرف کنیم و از طرفی از گاز سرد دیگر نمی توان جهت گرم کردن قسمت های مختلف دیگر استفاده گردد لذا مبحث رسوب دهنده های الکترواستاتیکی گرم به میان آمد که امکان این قضیه فراهم شود. در این روش امکان استفاده از ولتاژ بالا در اطراف الکترودها جهت جمع آوری ذرات با مقاومت بالا وجود دارد.

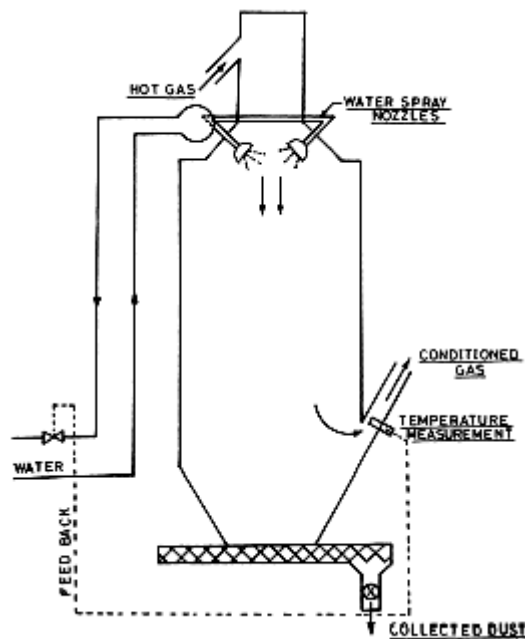
در روش انرژی دادن پالسی در مدت کوتاه در حد μs یا ms ولتاژ بالایی به الکترودها می دهیم. حسن ولتاژ بالا ایجاد ابرهای یونی متراکم و میدان قوی است که در عین حال تغییرات دمای گاز خروجی تأثیر چشمگیری بر راندمان آن ندارد.

عمل انرژی دادن پالسی به یکی از دو طریق زیر رخ می دهد

۱- باردهی پالسی متناوب (ms)

۲- باردهی چندپالسی (μs)

برای انرژی دادن پالسی معادله ۴ برای سرعت حرکت ذره می توان نوشت: [۳].



شکل ۵ - تجهیزات حالت دهی گاز قبل از ورود به رسوب دهنده

$$Ve = \left[\frac{k}{k+2} \right] \left[\frac{4E_p E_q c}{\mu} \right] D_p \quad (11)$$

در این فرمول E_p : حداکثر شدت میدان الکتریکی در انرژی دادن پالسی برحسب $\frac{v}{m}$ و E_q : میانگین شدت میدان می باشد و طبق این معادله با افزایش ولتاژ

E_p ، سرعت حرکت ذره در روش انرژی دادن پالسی افزایش می یابد

باردهی پالسی متناوب

در شکل ۶ تغییرات ولتاژ رسوب دهنده های الکترواستاتیکی را در حالت های مختلف می بینیم. در حالت معمولی برای هر نیم سیکل انرژی یک شلیک داریم، در حالت پالس متناوب به طور متناوب پالسهای ولتاژ بالا به میدان اصلی اضافه می شود.

در این روش فقط اجازه می دهیم ۳ یا ۵ نیم موج عبور کند و به این ترتیب جریان به $\frac{1}{3}$ یا $\frac{1}{5}$ حالت عادی تبدیل می شود. در این روش مدت پالس حدود ۳-۵ میلی ثانیه است.

این روش برای خنک کننده کلینکر در ۵ کارخانه سیمان در کره جنوبی و برای کارخانه های هندی استفاده شده است که علاوه بر برآوردن حد مجاز انتشار ذرات، مصرف انرژی را تا ۵۸ درصد کاهش داده است [۴]

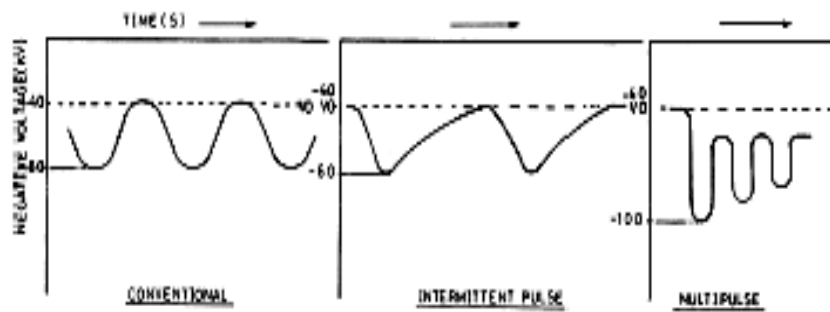
باردهی چندپالسی

همانطور که از نام آن پیداست، پالس های ولتاژ بالا در مدت کم، مکرراً به میدان dc اصلی اضافه می شود در این روش موج های ولتاژ بالا ایجاد می کند که طبق شکل ۵ دامنه موج به ترتیب کم می شود. قیمت رسوب دهنده های الکترواستاتیکیهای چندپالسی در مقایسه با برج های حالت دهی گاز خیلی کمتر است و استفاده از این رسوب دهنده های الکترواستاتیکیها برای تمیز کردن گاز کوره های پیش گرم کن با دمای ۲۰۰ تا ۲۴۰ °C در یک فرایند خشک سیمان مزایای زیر را نسبت به برج حالت دهی دارد: دوبرابر شدن سرعت حرکت گاز، ۳ تا ۴ برابر کاهش انتشار، ۷۰ تا ۸۰ درجه کاهش انرژی [۴]. شکل ۶ میزان انتشار ذرات را برای این روش در مقایسه با برق مستقیم نشان می دهد بزرگترین مزیت که از این شکل پیدا است عدم تاثیر دما در این روش است. در دمای پایین عملکرد انرژی دادن پالسی شبیه سیستم dc معمولی است.

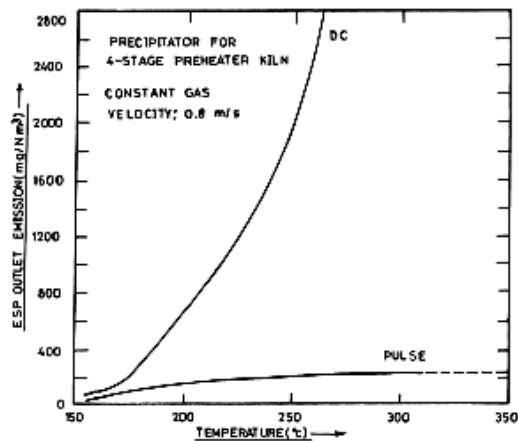
ترکیب رسوب دهنده های الکترواستاتیکی و فیلترهای کیسه ای

ترکیب رسوب دهنده های الکترواستاتیکی و فیلترهای کیسه ای وقتی که با حجم وسیعی از گاز روبرو هستیم بسیار سودمند است و مساحت صفحات الکترو فیلتر را تا حد چشمگیری کاهش می دهد.

در رسوب دهنده های الکترواستاتیکی اغلب ذرات در مرحله اول جدا می شوند و با تعویض بخش دوم با فیلتر کیسه ای عملکرد سیستم بالا می رود و از طرف مقابل فیلتر کیسه ای عملکرد قابل قبولی در جمع آوری ذرات کوچک دارد



شکل ۶ - تغییرات ولتاژ با زمان برای گونه های مخلف پالس دهی



شکل ۷ - تاثیر دما بر عملکرد رسوب دهنده برای برق مستقیم و برای روش پالس دهی

نتیجه گیری

۱- در این مقاله بیان شد که خواص گاز خروجی و ذرات بر عملکرد رسوب دهنده های الکترواستاتیکی تأثیر داشت از این خواص می توان کمیت گاز، درصد رطوبت گاز (نقطه شبنم)، غلظت ذرات، اندازه ذرات را نام برد.

۲- طبق مباحث تئوریکي بازدهی رسوب دهنده های الکترواستاتیکی با افزایش سرعت ذرات افزایش می یابد و سرعت ذرات به سمت الکتروده به پارامترهای زیر بستگی دارد:

الف- مربع پتانسیل الکتریکی الکترودها؛ ب- قطر ذرات ، ج- جذر دمای مطلق گازها

۳- سرعت حرکت ذرات به سمت الکتروده برای ذرات خیلی ریز ($< 1\mu$) و خیلی بزرگ ($> 1\mu$) نسبتاً بالا است.

۴- مقاومت ویژه ذرات با افزایش دما افزایش می یابد و به نقطه اوج خود می رسد و بعد افت می کند

۵- با افزایش دبی گاز خروجی بیشتر از مقدار طراحی، راندمان رسوب دهنده های الکترواستاتیکی کاهش می یابد.

۶- مقاومت ویژه ذرات با وجود قلبانیت محلول در آب و ترکیبات سولفات کاهش می یابد و وجود ترکیبات کلر در ذرات، آنها را چسبنده می کند.

۷- خواص گاز و ذرات خروجی خیلی تأثیر در تمیز کردن گاز خروجی دارد فرایندهای زیر جهت بهبود عملکرد رسوب دهنده الکترو استاتیکی پیشنهاد شد .

۷-۱- حالت دهی گاز به وسیله کاهش دمای گاز و افزایش رطوبت گاز و رقیق سازی هوا با هوای سرد که از برج های حالت دهی می توان استفاده کرد این روش هزینه بالای نگهداری داد و عملکرد خیلی قابل قبولی ارائه نکرده است.

۷-۲- تکنیک انرژی دادن پالسی یا رسوب دهنده های الکترواستاتیکی گرم که به ما اجازه استفاده از هوای داغ سرد نشده را می دهد و حسن آن ارزانتر بودن و کنترل انتشار ذرات است.

۷-۳- تکنیک ترکیب رسوب دهنده های الکترواستاتیکی و فیلترهای کیسه ای که در بعضی کارخانه های سیمان که ظرفیت بالایی دارند استفاده شود بهتر است چون که اندازه صفحات رسوب دهنده های الکترواستاتیکی را به شدت کم می کند

مراجع :

۱- عزیزی، محمد رضا، (۱۳۸۰)، تکنولوژی سیمان، انتشارات سیمان اکباتان، صفحات ۱-۶۰

۲- پرکینز، هنری، آلودگی هوا، ترجمه دکتر منصور غیاث الدین (۱۳۸۰)، دانشگاه تهران، چاپ چهارم

۳- هووارد س. پوی، دونالدر. روو، جرج چبانوگلاس، (۱۳۷۸)، مهندسی محیط زیست، ترجمه دکتر محمد علی کی نژاد و مهندس سیروس ابراهیمی،
دانشگاه صنعتی سهند، چاپ اول، ۱۳۷۸

۴ – *J.D.BAPAT,(۲۰۰۱) APPLICATION OF ESP FOR GAS CLFANING IN CEMENT INDUSTRY*
,JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIAL, Vol ۸۱

۵- *NOEL DE NEVERS(۲۰۰۰), AIR POLLUTION CONTROL ENGINEERING,*
UNIVERCITY OF UTAH