

بررسی آبگیری لجن فعال فاضلاب شهری با استفاده از فرآیند الکتروفلوتاسیون: بهینه سازی پارامترهای بهره‌برداری و مصرف انرژی

کازم گودینی*، زینب معصومی**، امیر باقی***، زهرا عطاغر****، قاسم آذریان*****

دریافت: ۹۳/۶/۱۲ پذیرش: ۹۳/۹/۲۵

چکیده:

مقدمه و هدف: روش‌های سنتی آبگیری لجن فاضلاب بدلیل ساختار کلونیدی و ماهیت ژله‌ای سلول باکتری‌های لخته لجن به مواد شیمیایی و انرژی نیاز داشته و از راندمان و مقبولیت زیست محیطی کمتری برخوردار می‌باشند و راهبری آنها بسیار پیچیده است. در این مطالعه برای کمینه سازی این محدودیتها از روش الکتروفلوتاسیون به عنوان یک روش نوین جهت آبگیری لجن استفاده گردید و پارامترهای بهره‌برداری و مصرف انرژی بهینه شدند.

روش کار: در این مطالعه تجربی - آزمایشگاهی بمنظور انجام آزمایشات از یک راکتور الکتروشیمیایی منقطع با حجم موثر ۴۵۰ میلی لیتر استفاده شد. اثر متغیرهای pH، شدت جریان الکتریکی، زمان ماند هیدرولیکی و تغییرات حجم / سطح الکتروود بر میزان آبگیری لجن و مقدار کل جامدات در کیک لجن (لجن آبگیری شده) و در آب جدا شده از لجن بررسی گردید. مقدار TSS، TS و COD در آب جدا شده از لجن نیز مورد بررسی قرار گرفت. مقدار انرژی الکتریکی مصرفی محاسبه و با بهینه سازی متغیرهای مطالعه مقدار آن کاهش داده شد.

نتایج: نتایج نشان داد بهترین راندمان آبگیری لجن (حدوداً ۸۱/۶ درصد) در $pH=2$ ، شدت جریان الکتریکی 1.7 mA/cm^2 ، زمان ماند ۳۰ min و مقدار سطح به حجم الکتروود $178 \text{ cm}^2/\text{L}$ با مقدار انرژی الکتریکی مصرفی به میزان $0.726 - 0.33 \text{ kWh/m}^3$ می‌باشد.

نتیجه نهایی: فرآیند الکتروفلوتاسیون به دلیل میزان کارایی بالا، سهولت ساخت و پایین بودن هزینه‌های ساخت و میزان مصرف انرژی در مقایسه با روشهای سنتی می‌تواند به طور موثر در آبگیری لجن فاضلاب به کار گرفته شود.

کلید واژه‌ها: الکتروفلوتاسیون / فاضلاب / لجن

مقدمه:

حجم لجن، سختی تعیین مواد شیمیایی مناسب و میزان دوزاژ آن مطلوب نمی باشد (۱،۳).

در سال‌های اخیر به خاطر محدودیت هایی که در روش‌های آبگیری سنتی لجن وجود دارد، تکنیک‌های مناسب تری برای آن ابداع شده است. برخی از این تکنیک‌ها مانند هضم لجن فاضلاب، معدنی سازی و پیش اکسیداسیون لجن فاضلاب، مقدار لجنی که باید آبگیری شود را کاهش داده و یا اینکه قابلیت آبگیری لجن را با ایجاد تغییرات در ساختار بیوشیمیایی آن افزایش

به دلیل ماهیت ذرات جامد موجود در لجن، آبگیری لجن فاضلاب فرآیند مشکلی است. ذرات جامد موجود در لجن فاضلاب، ریز و دارای ماهیت کلونیدی بوده و حالت ژله‌ای دارند که به خاطر ساختار لخته ایی آن که حالت پلیمری دارد می باشد. آبگیری لجن با روش‌های متعارف فیزیکی و مکانیکی مانند ته نشینی ثقلی، فیلتر دیافراگم فشاری، فیلتر خلاء و سانتریفوژ (۴-۱) به دلیل راندمان پایین و آبگیری به کمک مواد شیمیایی به دلیل افزایش

* کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی ایلام

** کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی همدان

*** کارشناس مهندسی بهداشت محیط شرکت آب و فاضلاب ایلام

**** دانشجوی دوره دکتری مهندسی بهداشت محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران

***** دانشجوی دکتری تخصصی پژوهشی بهداشت محیط مرکز تحقیقات علوم بهداشتی دانشگاه علوم پزشکی همدان (g.azarian@umsha.ac.ir)

بخش معطوف گردد. با توجه به پایین بودن زمان ماند و عدم نیاز به تاسیسات جانبی گران قیمت در سیستم الکتروفلوتاسیون، هزینه‌های ساخت به شدت پایین می‌آید. هزینه‌های بهره‌برداری نیز مرتبط با هزینه الکتروود انرژی می‌باشد، در اکثر مطالعات گذشته از الکتروودهای گران قیمتی مانند دی اکسید تیتانیم و دی اکسید اریدیم برای تغلیظ لجن استفاده شده است (۱۷-۱۵، ۱۳) در تنها مطالعه ای که توسط رحمانی و همکاران در سال ۲۰۱۳ انجام گرفت، از الکتروودهای ارزان قیمتی مانند استیل زنگ نزن استفاده گردیده است (۳) اما در مطالعه آنان به تغلیظ لجن فاضلاب کشتارگاه پرداخته شده که حاوی ذرات چربی بیشتری بوده که شناور سازی آن آسان می‌باشد.

در مطالعه حاضر آبیگری لجن تصفیه‌خانه فاضلاب شهر کرمانشاه به روش الکتروفلوتاسیون با کاربرد الکتروود استیل زنگ نزن مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای بهره‌برداری اعم از pH، شدت جریان الکتریکی و زمان ماند بهینه گردیدند. بعلاوه در این مطالعه به تعیین تاثیر سطح الکتروود بر میزان آبیگری لجن و کاهش هزینه‌های انرژی الکتریکی مصرفی پرداخته شد.

روش کار:

این مطالعه به صورت تجربی و با ایجاد یک پایلوت در مقیاس آزمایشگاهی در آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب شهری ایلام به مدت ۶ ماه انجام گردید. در مطالعه حاضر لجن خام مورد استفاده از خط برگشت لجن تصفیه‌خانه فاضلاب شهر کرمانشاه برداشت گردید. تصفیه‌خانه فاضلاب شهر کرمانشاه دارای یک مدول تصفیه فاضلاب به روش لجن فعال می‌باشد. حدود ۹۰٪ لجن تولیدی از حوضچه ته نشینی ثانویه مجدداً به خط برگشت لجن حوضچه هوادهی برگشت داده می‌شود. مابقی لجن تولیدی پس از تصفیه اولیه دفع می‌گردد. حجم لجن تولیدی در یک شبانه روز حدود ۷/۵ مترمکعب و هزینه مقدار برق مصرفی با ۲/۵ ساعت کار در طول شبانه روز برای پمپاژ لجن برگشتی، حدود ۱۰۰۰۰۰۰ ریال برآورد می‌گردد. به دلیل اینکه محدوده زمانی انجام مطالعه محدود به یک فصل خاص بود، اختصاصات لجن تغییرات زیادی نداشته و در طول تحقیق سعی شد از نمونه‌های تازه استفاده شود. نمونه‌های برداشتی در دمای ۴°C به آزمایشگاه منتقل شدند. خصوصیات لجن خام مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

می‌دهند (۵). با این حال لجن باقیمانده به سختی آبیگری شده و ابداع روش‌های جدید برای این امر ضروری است. بعضی از روش‌های جدید که برای افزایش توان آبیگری لجن به تنهایی و یا به صورت ترکیبی به کار گرفته شده اند، شامل استفاده ترکیبی از روش‌های مکانیکی و حرارتی، نیروی مکانیکی و یک میدان الکتریکی، نیروی اولتراسوند و میدان مغناطیسی، استفاده همزمان از اولتراسوند و میدان الکتریکی، نیروی فشار و برش، استفاده از میکروویو و استفاده از انواع شیمیایی مختلف می‌باشند (۱۰-۵). هر یک از این روش‌ها از معایب خاص خود برخوردارند مانند پیچیدگی ابزارها و راهبری سخت آنها، راندمان پایین هر یک این روش‌ها به تنهایی و نیاز به استفاده ترکیبی آنها، مصرف انرژی بالا و مواد شیمیایی مازاد و نیز عدم مقبولیت زیست محیطی (۵، ۳).

در سالهای اخیر کاربرد فرآیند الکتروفلوتاسیون پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته و به طور موفقیت آمیزی برای جداسازی مواد سبک با قابلیت شناوری بالا از قبیل چربی و روغن، جلبک، ذرات لاتکس، سورفاکتانت‌ها و ... به کار گرفته شده است (۳). طی این فرآیند شناور سازی لجن در دو مرحله تولید میکرو حباب‌های گاز هیدروژن و اکسیژن در سطح الکتروود و متعاقب آن شناور سازی ذرات لجن توسط این میکرو حباب‌ها صورت می‌گیرد (۱۷-۱۱). مطالعه چو و همکاران نشان داد، روش الکتروفلوتاسیون میکرو حباب‌هایی با اندازه کوچکتر، یکنواخت‌تر و با میزان انرژی مصرفی کمتری نسبت به شناور سازی با هوای محلول (Dissolve Air Floation; DAF) تولید نموده که در شناور سازی ذرات ریزتر و لجن مازاد موثرتر است. میزان آبیگری و بار جامدات لجن تغلیظ شده در این روش بیشتر از DAF و ته نشینی ثقی می‌باشد (۱۵). مزیت‌هایی که این روش را برتر از روش‌های فیزیکی و شیمیایی می‌نماید عبارتند از: عدم نیاز به افزودن ماده شیمیایی مازاد و به تبع آن کاهش حجم لجن، ثبات راندمان و مقبولیت محیط زیست و پایین بودن زمان واکنش که قابلیت استفاده از این تکنیک را در مناطقی که با محدودیت زمین روبرو هستند، مناسب تر می‌نماید (۳).

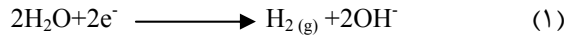
با توجه به اینکه نگرانی اصلی بیشتر صنعتگران، طراحان و مدیران تصفیه‌خانه‌ها کاهش هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری سیستم می‌باشد، توسعه یک سیستم نوین علاوه بر تامین راندمان مطلوب باید به کاهش هزینه در این دو

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و شیمیایی لجن خام

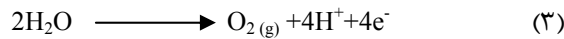
واحد	مقدار	پارامتر
-	6.7-7.7	pH
mg/L	5520-7910	اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)
μS/cm	1199-2021	هدایت الکتریکی (EC)
mg/L	1420-2596	کل جامدات محلول (TDS)
mg/L	3960-19400	کل جامدات معلق (TSS)
mg/L	6456-20824	کل جامدات (TS)

ذرات و فلوکهای لجن و شناور سازی آنها (۳، ۱۵، ۱۸). واکنش‌های صورت گرفته در الکترودها به صورت زیر می‌باشد:

در سطح کاتد:



در سطح آند



مهمترین متغیرهای این مطالعه شامل pH (۰-۱۰)، شدت جریان الکتریکی (A) (۰/۵-۰/۱)، زمان ماند (۱۵-۶۰ min) و نسبت سطح الکترودها به حجم لجن (S/V) (۱۷۸، ۲۶۰ و ۳۴۹ cm²/L) به روش یک متغیر در یک زمان بهینه‌سازی شدند (۱۹). کلیه آزمایشات در محیط آزمایشگاه و در دمای ۲۵°C انجام گرفت. برای اندازه گیری میزان آبیگری لجن، درصد حجم آب جدا شده از لجن خام اندازه گیری گردید. به علاوه بار جامدات کل در یک لجن (لجن آبیگری شده) و آب جدا شده از لجن و همچنین مقدار جامدات معلق و COD (chemical oxygen demand) در آب جدا شده از لجن اندازه گیری گردید و طبق فرمول شماره ۴ کارایی حذف آنها با اندازه گیری آن قبل و بعد از فرآیند الکتروفلوتاسیون بدست آمد (۲۰).

$$\text{Removal efficiency (\%)} = [(C_i - C_f)/C_i] \times 100 \quad (۴)$$

در اینجا C_i و C_f به ترتیب غلظت آلاینده قبل و بعد از انجام فرآیند الکتروفلوتاسیون می باشد.

شدت جریان الکتریکی با فرمول ۵ محاسبه گردید (۳).

$$CD = I/S \quad (۵)$$

در اینجا CD (current density) شدت جریان الکتریکی (mA/cm²)، I جریان الکتریکی ورودی به سل (mA)، S سطح کل آند (cm²) می باشد.

میزان انرژی مصرفی به ازای هر مترمکعب لجن تصفیه شده با فرمول ذیل محاسبه گردید (۲۱).

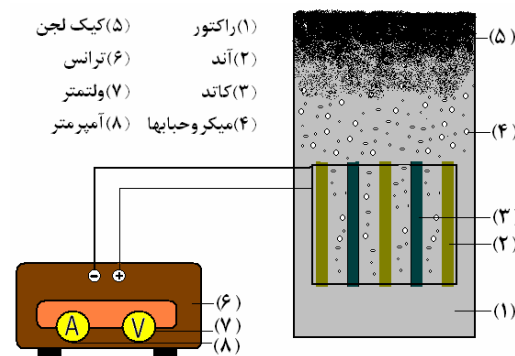
$$E = VIt/V_R \quad (۶)$$

در اینجا V متوسط ولتاژ ورودی به سل الکتروشیمیایی (V)، t، زمان ماند هیدرولیکی (min) و V_R حجم راکتور (m³) می باشد.

کل جامدات محلول (Total dissolved solid; TDS) و هدایت الکتریکی (Electro-conductivity; EC) توسط یک هدایت سنج آزمایشگاهی مدل HACH و pH توسط

در این مطالعه از اسید سولفوریک و هیدروکسید سدیم برای تنظیم pH استفاده شد. کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده از شرکت مرک آلمان و با خلوص ۹۹/۵٪ تهیه گردید.

شکل ۱ راکتور مورد استفاده را نشان می دهد. فرآیند در یک بشر ۸۰۰ لیتری با حجم موثر ۴۵۰ میلی لیتر و با استفاده از الکترودهای صفحه ای با ابعاد ۱۲×۵×۰/۲ cm که در وسط راکتور جانمایی گردیده بود، صورت می گرفت. فاصله الکترودها ۱ cm و آرایش آنها به صورت منوپلار بود. برای انجام فرآیند، الکترودها به منبع برق مستقیم وصل شدند. شرکت سازنده منبع برق، شرکت همدان کیت و مدل آن Adak.ps_405 بود. این منبع توانایی تامین شدت جریان ۶-۰ آمپر و میزان ولتاژ ۳۰-۰ ولت را داشت. قبل از هر آزمایش الکترودها ابتدا با محلول اسید کلریدریک ۱۵ درصد و سپس با آب مقطر شستشو شدند.



شکل ۱: راکتور آبیگری لجن به روش الکتروفلوتاسیون

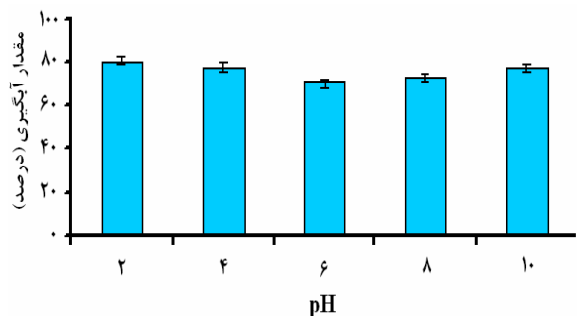
طی فرآیند الکتروفلوتاسیون جهت آبیگری لجن دو مکانیسم اتفاق می افتد. اول الکترولیز آب و تولید الکتریکی میکروحبابهای O₂ و H₂ در سطح الکترودها (با اعمال شدت جریان الکتریکی به سیستم طبق واکنشهای زیر) و دوم گیر افتادن میکروحبابها در بین

یک pH متر پورتال مدل HACH اندازه گیری شدند. برای بررسی متغیر pH از محلول بافر استفاده شده و تغییرات آن تا ۰/۱ واحد کنترل گردید. کل جامدات معلق (Total Suspended Solid; TSS)، کل جامدات (Total solid; TS) و COD به ترتیب به روش وزن سنجی و رفلکس باز بر اساس دستورالعمل کتاب استاندارد متد، کدهای ۲۵۴۰ و ۵۲۲۰ اندازه گیری شدند (۲۲). همه آزمایشات ۳ بار تکرار گردید به طوری که ضریب ICC (Intraclass Correlation Coefficient) بین ۰/۶۹-۰/۸۵ بود.

برای دستیابی به بهترین راندمان در آبیگری لجن فعال تصفیه خانه فاضلاب متغیرهای pH، شدت جریان الکتریکی، زمان ماند و میزان سطح الکتروود بهینه سازی گردیدند. با توجه به نقش جنس الکتروود در فرآیند الکتروفلوتاسیون و نظر به مطالعات اخیر در زمینه تغلیظ لجن فعال با فرآیند الکتروفلوتاسیون که بهترین الکتروود را از نوع استیل زنگ نزن معرفی نموده اند (۳،۱۳) جهت بهینه سازی متغیرهای اصلی در این مطالعه از استیل زنگ نزن استفاده گردید.

نتایج:

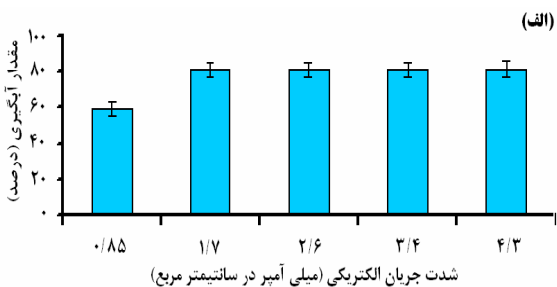
شکل ۲ تاثیر pH در میزان آبیگری لجن در شدت جریان الکتریکی ۱/۷ mA/cm² و زمان ماند ۳۰ min را نشان می دهد. بالاترین میزان آبیگری (۸۰/۵ درصد) در pH=۲ بدست آمد. البته برای مطالعه این متغیر و به دلیل جلوگیری از نوسانات و ایجاد اختلال در فرآیند بهینه سازی از pH بافری ۰/۱، ۰/۶، ۰/۴، ۰/۲ و ۰/۱ استفاده شد و تغییرات آن تا مقدار ۰/۱ واحد کنترل گردید.



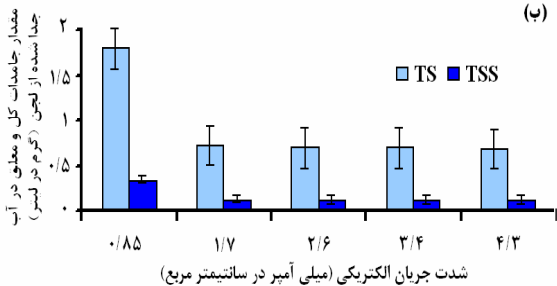
شکل ۲: بررسی تاثیر تغییرات pH در میزان آبیگری لجن فعال فاضلاب شهری

(شرایط ثابت زمان ماند ۳۰ min و شدت جریان الکتریکی ۱/۷ mA/cm²)

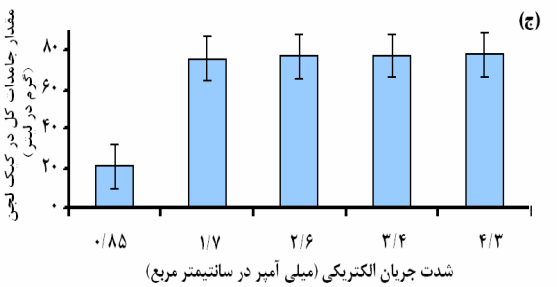
در شرایط شار عبوری ثابت ۳/۸۵ C/cm² و pH=۲ از شدت جریان های الکتریکی ۰/۸۵، ۱/۷، ۲/۶، ۳/۴ و



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳: بررسی تاثیر شدت جریان الکتریکی

(الف) میزان آبیگری لجن فعال فاضلاب شهری (ب) مقدار جامدات کل در آب جدا شده از لجن (ج) مقدار جامدات کل در لجن آبیگری شده (در شرایط ثابت زمان ماند ۳۰ min و pH=۲)

میزان ولتاژ کاربردی، در حالت بهینه متغیرهای طرح ($\text{pH}=2$)، شدت جریان الکتریکی $1/7 \text{ mA/cm}^2$ و زمان ماند ۳۰ دقیقه) میزان انرژی الکتریکی مصرفی به میزان $0/33 - 0/726 \text{ kWh/m}^3$ بدست آمد.

نظر به تاثیر مستقیم میزان سطح الکترود در مقدار میکروحوباب های تولیدی و به تبع آن افزایش مقدار آبیگری لجن، پس از بهینه سازی متغیرهای اصلی طرح به بررسی تاثیر نسبت S/V بر مقدار آبیگری لجن اقدام گردید. همانطور که از نتایج جدول ۲ نیز مشخص است افزایش مقدار S/V از مقدار ۱۷۸ به 260 و $349 \text{ cm}^2/\text{L}$ با افزایش مقدار آبیگری از مقدار ۷۴ درصد به مقدار $81/6$ و $81/2$ درصد همراه است. از طرف دیگر استفاده از S/V بالا در یک فاصله یکسان باعث کاهش میزان ولتاژ کاربردی و در نتیجه کاهش میزان انرژی مصرفی گردید به طوری که برای S/V ۱۷۸، 260 و $349 \text{ cm}^2/\text{L}$ مقدار انرژی الکتریکی مصرفی به ترتیب به میزان $0/4$ ، $0/33$ و $0/36 \text{ kWh/m}^3$ بدست آمد. جدول ۲ همچنین نتایج تغییرات S/V بر مقدار TS کیک لجن و نیز مقدار TSS ، TS و COD در آب جدا شده از لجن در حالت های بهینه متغیرها را نشان می دهد. در بهترین حالت میزان COD و TSS در آب جدا شده از لجن به ترتیب به میزان 284 و 180 mg/L بدست آمد.

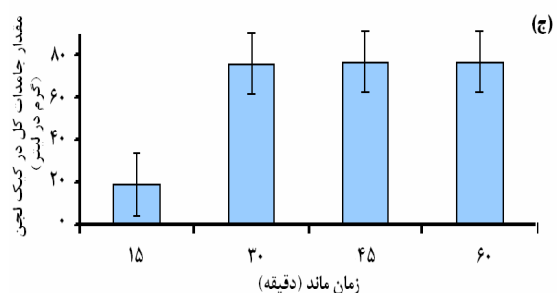
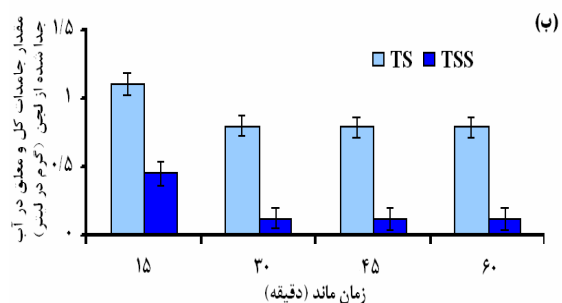
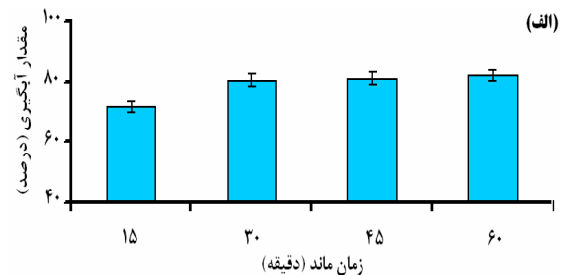
جدول ۲: بررسی تاثیر نسبت سطح الکترود به حجم لجن (S/V) در شرایط ثابت زمان ماند ۳۰ دقیقه، شدت جریان الکتریکی $1/7 \text{ mA/cm}^2$ و $\text{pH}=2$

نسبت سطح الکترود به حجم لجن (cm^2/L)			
۱۷۸	۲۶۰	۳۴۹	
۳۱۰۰۰	۷۶۰۱۰	۷۵۵۸۰	TS در کیک لجن (mg/L)
۱۲۲۰	۵۵۰	۵۶۱	TS در آب حاصل از آبیگری (mg/L)
۴۲۰	۱۸۰	۱۹۸	TSS در آب حاصل از آبیگری (mg/L)
۸۰	۳۷۰	۳۶۳	TDS در آب حاصل از آبیگری (mg/L)
۴۵۱	۲۸۴	۳۰۲	COD در آب حاصل از آبیگری (mg/L)
۱/۰۴	۰/۷۳	۰/۳۶	مقدار انرژی مصرفی (kWh/m^3)
۷۴	۸۱/۶	۸۱/۲	مقدار آبیگری لجن (درصد)

بحث:

بررسی پارامترهای بهره برداری اعم از pH ، شدت جریان الکتریکی و زمان ماند نشان داد که انتخاب بهینه این پارامترها در افزایش آبیگری لجن تاثیر بسزایی داشته و افزایش S/V تا حد بهینه علاوه بر بهبود میزان آبیگری

نتایج بررسی زمان ماند هیدرولیکی در مقدار آبیگری لجن و همچنین تاثیر آن بر مقدار جامدات کل در آب جدا شده از لجن و کیک لجن در شکل ۴ الف، ب و ج آورده شده است. با کاربرد شدت جریان الکتریکی و pH بهینه، زمان ماند بهینه برابر با ۳۰ دقیقه بدست آمد. در این زمان ماند، مقدار آبیگری لجن و مقدار جامدات کل در آب جدا شده از لجن و کیک لجن به ترتیب برابر $80/7$ درصد، $0/8$ و $76/1 \text{ g/L}$ حاصل شد. استفاده از زمان ماند های بالا تاثیری در آبیگری بیشتر لجن نداشته به طوری که ادامه آبیگری تا زمان ۶۰ دقیقه فقط به مقدار $1/2$ درصد افزایش در مقدار آبیگری را (نسبت به ۳۰ دقیقه اول) بهبود بخشید و مقدار جامدات کل در آب جدا شده از لجن و کیک لجن به ترتیب به میزان $0/79$ و $77/1 \text{ g/L}$ بدست آمد.



شکل ۴: بررسی تاثیر زمان ماند

(الف) میزان آبیگری لجن فعال فاضلاب شهری (ب) مقدار جامدات کل در آب جدا شده از لجن (ج) مقدار جامدات کل در لجن آبیگری شده (در شرایط ثابت شدت جریان الکتریکی $1/7 \text{ mA/cm}^2$ و $\text{pH}=2$)

با توجه به تاثیر پذیری مستقیم میزان انرژی مصرفی از زمان ماند و شدت جریان الکتریکی و به تبع آن متوسط

است. در مطالعه ای اخیر که مربوط به تاثیر S/V بر تغلیظ لجن می باشد، فقط به این موضوع اشاره شده که استفاده از S/V بیشتر با افزایش میکروحباب های تولیدی و در نتیجه افزایش راندمان همراه است و تغییرات و تاثیر آن بر میزان مصرف انرژی مورد بررسی قرار نگرفته است (۳). بالاترین راندمان آبیگری لجن توسط چویی و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از الکترودهای استیل زنگ نزن و اکسید ایریدیم با پوشش تیتانیم در شدت جریان 10 mA/cm^2 و با میزان انرژی مصرفی $1/5 - 0/25 \text{ kWh/m}^3$ (۱۳) و توسط رحمانی و همکاران در سال ۲۰۱۳ با کاربرد الکترودهای استیل زنگ نزن در شدت جریان 1 mA/cm^2 و با میزان انرژی مصرفی $1 - 0/15 \text{ kWh/m}^3$ بدست آمد (۳) این در حالی است که در مطالعه حاضر با کاربرد الکترودهای استیل زنگ نزن و با بهینه سازی S/V با شدت جریان $1/7 \text{ mA/cm}^2$ ، میزان انرژی مصرفی به $0/726 - 0/33 \text{ kWh/m}^3$ کاهش داده شد. در مطالعه رحمانی و در مطالعه حاضر مقدار بار جامدات جدا شده از لجن به ترتیب برابر ۴۰ و 76 g/L بدست آمد. در مقایسه با مطالعه Choi و رحمانی که به ترتیب از نسبت S/V ۷۵ و $113 \text{ cm}^2/\text{L}$ استفاده نموده بودند، در این مطالعه از نسبت S/V $260 \text{ cm}^2/\text{L}$ استفاده شد و میزان مصرف انرژی الکتریکی کاهش یافت.

راندمان تغلیظ لجن فعال توسط فرآیندهای سنتی مانند DAF، ته نشینی ثقلی، سانتریفوژ، سیستمهای گرانشی و چرخشی و آبیگری با استفاده از آهک پایین تر از روش الکتروشیمیایی بوده و بالاترین غلظت جامدات بدست آمده در کیک لجن حداکثر ۶ درصد می باشد (۲۴) این در صورتی است که در آبیگری به روش الکتروشیمیایی حداکثر غلظت جامدات به میزان ۷/۵ درصد بدست آمد. دلیل عدم دستیابی به راندمان مطلوب در تکنیک های مکانیکی و شیمیایی، ساختار ویژه سلول باکتری های لخته لجن (extra-cellular polymeric substances; EPSs) است که حتی با تحمل فشار بالا، مانع مهمی در آبیگری لجن محسوب می گردد (۱،۳) زیرا ساختار ژله مانند این باکتری ها باعث گیر کردن آب در بین فلوک ها شده و مانع آبیگری آن بوسیله روشهای ثقلی و شیمیایی می گردد اما این ساختار به عنوان یک مزیت در تکنیک الکتروفلوتاسیون بوده که با افزایش نسبت جامد/گاز (Gas/Solid) این گونه لجن ها را به راحتی شناور می نماید (۱۶) زیرا میکرو-

لجن با کاهش هزینه های انرژی الکتریکی مصرفی همراه است لذا با بهینه سازی این پارامترها هزینه های انرژی کاهش داده می شود.

pH یکی از مهمترین متغیرها در سیستمهای الکتروشیمیایی بوده و مطالعات گذشته نیز نشان می دهد در تغلیظ لجن فاضلاب به روش الکتروفلوتاسیون این پارامتر موجب تولید میکروحباب هایی با کیفیت بهتر شده در نتیجه ذرات با اندازه های مختلف را به راحتی شناور می نماید (۱۷). نتیجه این مطالعه با پژوهش رحمانی و همکاران مطابقت داشته و $\text{pH}=2$ را به عنوان بهترین pH معرفی می نماید (۳). از طرف دیگر با توجه به اینکه الکترولیز آب در pH های پایین در تولید بهتر مولکول و یون هیدروژن نقش بسزایی ایفا می کند، از این pH برای بهینه سازی متغیرهای دیگر استفاده گردید. البته باید یادآوری شود که به دلیل استفاده از pH های بافری تغییرات آن در طول فرآیند قابل کنترل بود اما به دلیل تولید یون هیدروکسیل بر روی کاتد (۲۳) هنگامی که از بافر استفاده نشود pH لجن خروجی حداکثر تا دو واحد افزایش یافته و از اسیدیته لجن کاسته می شود.

طبق فرمول محاسبه میزان انرژی الکتریکی مصرفی در راکتورهای الکتروشیمیایی (فرمول ۶)، افزایش زمان ماند هیدرولیکی و شدت جریان الکتریکی با مصرف بالای انرژی همراه بوده و اقتصادی نمی باشد (۲۳). اگرچه استفاده از شدت جریانهای الکتریکی بالا باعث افزایش دما شده و این افزایش دما نرخ واکنشهای شیمیایی را افزایش و ویسکوزیته را کاهش می دهد که در نهایت جداسازی و آبیگری لجن را بهبود می بخشد اما به سه دلیل جنبه های اقتصادی، تولید میکروحباب های بزرگتر و افزایش دگازینگ (خروج گاز به دام افتاده در بین فلوکهای لجن و افت راندمان) مناسب نمی باشد (۳،۲۱). همانطوری که داده های بهینه شدت جریان الکتریکی و زمان ماند نیز نشان داد، افزایش این دو پارامتر تا یک محدوده خاص مناسب بوده و بیش از آن، علاوه بر عدم افزایش کارایی با مصرف انرژی بیشتر همراه است.

علاوه بر میزان کارایی، ملاحظات اقتصادی بخصوص میزان مصرف انرژی در انتخاب یک فرآیند از اهمیت ویژه ای برخوردار است. متغیری که در مطالعات گذشته کمتر به آن پرداخته شده است بررسی تاثیر نسبت S/V بر میزان راندمان و تاثیر آن بر میزان مصرف انرژی الکتریکی

سپاسگزاری:

این مقاله برگرفته از طرح تحقیقاتی شرکت آب و فاضلاب شهری ایلام به شماره ۵۰۷۹/۱۰ می باشد. نویسندگان از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی ایلام و نیز شرکت آب و فاضلاب که این طرح را از لحاظ مالی حمایت نموده اند، تشکر و قدردانی می نمایند.

منابع:

- Mahmoud A, Olivier J, Vaxelaire J, Hoadley AFA. Electro-dewatering of wastewater sludge: influence of the operating conditions and their interactions effects. *Water Res* 2011; 45(9): 2795-2810.
- Saveyn H, Pauwels G, Timmerman R, Meeren PVD. Effect of polyelectrolyte conditioning on the enhanced dewatering of activated sludge by application of an electric field during the expression phase. *Water Res* 2005;39(13): 3012-3020.
- Rahmani AR, Nematollahi D, Godini K, Azarian G. Continuous thickening of activated sludge by electro-flotation. *Sep Purif Technol* 2013; 107: 166-171.
- Qi Y, Thapa KB, Hoadley AFA. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties – a review. *Chem Eng J* 2011; 171(2): 373-384.
- Mahmoud A, Olivier J, Vaxelaire J, Hoadley AF. Advances in mechanical dewatering of wastewater sludge treatment. *Wastewater reuse and management*. New York: Springer; 2013: 253-303.
- Gao LX, Liu XC, Wang M, Huang L. Dewatering excess sludge's of sanitary sewage by super sound and PAFC. *Appl Mech Mater* 2013; 361: 805-808.
- Vaxelaire J, Olivier J. Compression dewatering of particulate suspensions and sludge: effect of shear. *Dry Technol* 2014; 32(1): 23-29.
- Weng CH, Lin YT, Yuan C, Lin YH. Dewatering of bio-sludge from industrial wastewater plant using an electrokinetic-assisted process: effects of electrical gradient. *Sep Purif Technol* 2013; 117: 35-40.
- Ayol A, Durak G. Fate and effects of fry-drying application on municipal dewatered sludge. *Dry Technol* 2013; 31(3): 350-358.
- Valderrama C, Granados R, Cortina JL. Stabilisation of dewatered domestic sewage sludge by lime addition as raw material for the cement industry: understanding process and reactor performance. *Chem Eng J* 2013; 232: 458-467.
- Choi YG, Kim HS, Park YH, Jeong SH, Son DH, Oh YK, Yeom LT. Improvement of the thickening and dewatering characteristics of activated sludge by electro-flotation (EF). *Water Sci Technol* 2005; 52: 219-226.
- Cho KW, Kim YJ, Choi YG, Hong SW, Choi YS

حباب های تولید شده به راحتی در بین فلوک های ژله مانند گیر کرده و به راحتی شناور می شوند. بنابراین، فرآیند الکتروفلوتاسیون برای آبگیری لجن هایی که آبگیری آنها توسط روشهای سنتی به سختی صورت می گیرد، مطلوب می باشد. در روش های شیمیایی علاوه بر اینکه بهره برداران نیازمند تجربه بالا در تعیین مقدار ماده مصرفی می باشند (۱) افزایش حجم لجن و ملاحظات دفع نهایی نیز از معایب آن می باشد. در صورت استفاده از الکترودهای تازه و نظافت دائمی آنها میکرو حباب های حاصل از الکترولیز آب در روش الکتروفلوتاسیون، ریزتر و یکنواخت تر از DAF می باشند و راندمان آنها نیز بالاتر از DAF است (۱۵). گیر افتادن میکرو حباب های گازهای هیدروژن و اکسیژن در بین فلوک های لجن یک فاکتور اساسی در آبگیری لجن است (۱۱). در روش های نوین نیز سیستم های معرفی شده نیازمند تجهیزات پیشرفته و پیچیده ای می باشند که علاوه بر حساسیت، نیازمند اپراتورهای با تجربه هستند (۱۰-۵). روش الکتروفلوتاسیون از تجهیزات ساده ای برخوردار بوده و به راحتی قابل راهبری است (۳) به علاوه بررسی های چو و همکاران نشان می دهد انرژی الکتریکی مصرفی توسط فرآیند الکتروفلوتاسیون برای جداسازی فاضلاب های چرب ۴۰-۱۶ درصد کمتر از DAF و ۷۰-۴۰ درصد کمتر از ته نشینی می باشد (۱۵). تنها عیب آن، عدم جداسازی ذرات با ماهیت معدنی و سنگین می باشد، زیرا لجن فاضلاب شهری در مقایسه با لجن های حاصل از صنایعی که حاوی ترکیبات چربی و روغن بیشتری هستند دارای مواد معدنی بیشتری بوده و بنابراین راندمان پایین تری حاصل می گردد.

نتیجه نهایی:

یافته های این مطالعه نشان داد تکنیک الکتروفلوتاسیون نسبت به تکنیک های سنتی کارایی بیشتری در آبگیری لجن بخصوص لجن هایی که به سختی آبگیری می شوند، دارد. با توجه به بهینه سازی متغیرها و کاهش میزان مصرف انرژی نسبت به مطالعات گذشته در زمینه آبگیری لجن با این تکنیک و نیز به دلیل راهبری ساده، مقبولیت زیست محیطی، عدم ایجاد باقیمانده مضر در لجن و به دلیل ملاحظات اقتصادی این تکنیک می تواند به عنوان یک روش مناسب در تصفیه خانه های فاضلاب، جهت آبگیری لجن و کاهش حجم آن به کار گرفته شود.

- Chung TH. Significance of gas to solids ratio in clarification and thickening of activated sludge by electro-flotation. In: Proceedings of the fifth IWA international conference on flotation. Seoul; 2007:239-246.
13. Choi YG, Kim SH, Kim HJ, Kim YJ, Chung TH. Effects of current density and electrode material on the dewaterability of the thickened activated sludge by electro-flotation. *J Chem Technol Biotechnol* 2009; 84(10): 1493-1498.
 14. Cho KW, Kim YJ, Choi YG, Hong SW, Chung TH. Ratio of electrolytic bubbles to solids as a governing parameter of flotation for activated sludge. *Environ Eng Sci* 2009; 26(6): 1131-1138.
 15. Cho KW, Chung CM, Kim YJ, Chung TH. Continuous clarification and thickening of activated sludge by electrolytic bubbles under control of scale deposition. *Biores Technol* 2010; 101(9): 2945-2951.
 16. Chung CM, Cho KW, Hong SW, Kim YJ, Chung TH. Feasibility of electro-flotation to separate solids and liquid in an activated sludge process. *Environ Technol* 2009; 30(14): 1565-1573.
 17. Chen JL, Wan J, Shi HC. Electro-flotation using in solid-liquid separation of activated sludge. *Huan Jing Ke Xue* 2006; 27(11): 2333-2338.
 18. Seid Mohammadi A, Mehralipour J, Shabanlo A, Roshanaie G, Barafrashtehpour M, Asgari G. [Comparing the electrocoagulation and electro-fenton processes for removing nitrate in aqueous solution for Fe electrodes]. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2013; 23(104): 57-67 (Persian).
 19. Godini K, Azarian G, Rahmani AR, Zolghadrnasab H. Treatment of waste sludge: a comparison between anodic oxidation and electro-fenton processes. *J Res Health Sci* 2013; 13(2): 188-193.
 20. Rahmani H, Gholami M, Mahvi AH, Alimohammadi M, Azarian G, Esrafil A, et al. Tindazole Removal from aqueous solution by sonolysis in the presence of hydrogen peroxide. *Bull Environ Contam Toxicol* 2014; 92(3): 341-346.
 21. Godini K, Azarian G, Nematollahi D, Rahmani AR, Zolghadrnasab H. Electrochemical treatment of poultry slaughterhouse wastewater using iron and aluminum electrodes. *Res J Chem Environ* 2012; 16 (3): 98-103.
 22. American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed. Washington, DC: APHA, 2005.
 23. Curteanu S, Piuleac CG, Godini K, Aazaryan G. Modeling of electrolysis process in wastewater treatment using different types of neural networks. *Chem Eng J* 2011; 172 (1): 267-276.
 24. Davis ML. Water and wastewater engineering: design principles and practice. New York: McGraw-Hill, 2010: 1150-1162.

*Original Article***Investigation of Activated Sludge Sewage Dewatering by Electro-Flotation: Optimization of Operating Parameters and Energy Consumption**

K. Godini, M.Sc.^{*}; Z. Masoumi, M.Sc.^{**}; A. Baghi, B.Sc.^{***}; Z. Atafar, M.Sc.^{****}
G. Azarian, M.Sc.^{*****}

Received: 3.9.2014

Accepted: 16.12.2014

Abstract

Introduction & Objective: Common methods for dewatering of wastewater sludge need chemicals and high energy consumption and have low efficiency and environmental acceptability because of colloidal and jelly property of bacteria cells of sludge. Furthermore, their operating is completely complicated. In this study electro-flotation way, as a novel method, was performed to cover these limitations and also operating parameters and energy consumptions were optimized.

Materials & Methods: In order to carry out the experiments, a batch reactor with the effective volume of 450 ml was used. In this experimental- laboratorial study, the effect of pH, current density, hydraulic retention time and surface/volume changes on the amount of dewatering and the amount of total solids in both the sludge cake (dewatered sludge) and the water separated from the sludge as well as the content of TSS, TS and COD in the water were investigated. The amount of consumed electricity was calculated and lowered by optimizing the variables.

Results: The finding showed that the best efficiency (81.6%) of sludge dewatering was achieved at pH = 2, current density = 1.7mA/cm², hydraulic retention time = 30 min and surface/volume amount = 178 cm²/L with electrical energy consumption of 0.33-0.726 kWh/m³.

Conclusion: The electro-flotation process owing to high efficiency, convenient construction and operating and lower energy consumption and construction costs compared to common methods can effectively be applied.

(*Sci J Hamadan Univ Med Sci 2015; 21 (4):341-349*)

Keywords: Electroflotation / Sewage / Sludge

* M.Sc. in Environmental Health, Ilam University of Medical Sciences & Health Services, Ilam, Iran.

** M.Sc. in Environmental Health, Hamadan University of Medical Sciences & Health Services, Hamadan, Iran.

*** B.Sc. in Environmental Health, Ilam Municipality Water and Wastewater Company, Ilam, Iran.

**** Ph.D. Student of Environmental Health, School of Health

Tehran University of Medical Sciences & Health Services, Tehran, Iran.

***** Ph.D. by Research Student, Health Sciences research Center

Hamadan University of Medical Sciences & Health Services, Hamadan, Iran. (g.azarian@umsha.ac.ir)