بررسی همزمان تولید برق و اکسیداسیون فتوکاتالیستی مواد آلی موجود در پساب

ز هرا ضمیرایی*[۱]، سمیه باقی‌پور[۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۰/۳/۷
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۰/۶/۲۳

چکیده:

حذف همزمان آلاینده های آلی از محلول آبی و تولید برق با یک ابزار آزمایشگاهی جدید که ترکیب یک راکتور فتوکاتالیستی و یک پیل الکتروشیمیایی است مورد مطالعه قرار گرفت. سیستم پیشنهادی متکی بر قابلیت کاهش یون‌های Cu^{+2} در حضور TiO_2 ، تابش UV (خورشیدی) و یک ماده آلی فداشونده است در محلول آندی پیل فتوراکتوری، Cu^{o} به Cu^{+2} اکسید شده و دوباره Cu^{+2} به پایین ترین حالت اکسیداسیونی کاهش می یابد. استفاده از عوامل مختلف فداشونده مانند فرمیک اسید (FA) و گلیسرول (GLY) به همراه دو کاتد مختلف برای این پیل مورد بررسی قرار گرفت که براساس جفت اکسایشی – کاهشی Cu^{+2}/Cu^{o} و دیگری براساس O_2/H_2O عمل می کند. نتایج حاصل از این کار نشان می دهد که ترکیب یک راکتور فتوکاتالیستی و پیل الکتروشیمیایی برای دستیابی به حذف همزمان آلاینده های آلی از محلول آبی و تولید برق امکان‌پذیر است.

کلمات کلیدی:
کاهش فتوکاتالیستی، الکترود مس، ماده آلی، تولید برق

۱) کارشناس ارشد شیمی آلی، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی
۲) کارشناس ارشد شیمی تجزیه، پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی
* نویسندهٔ مسئول
Zamiraei@gmail.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

مقدمه

در طول دهه گذشته، انتشار گاز CO_2 حاصل از احتراق سوخت های فسیلی باعث افزایش نگرانی ها شده است. این امر سبب تحقیقات بیشتر برای یافتن راه حل جدید در تولید انرژی از مواد تجدیدپذیر (زیست توده) شده است که این مواد حاصل تصفیه پسماندها و پسابها می‌باشد. در این میان، پیل‌های سوختی میکروبی به دلیل توانایی استفاده کاتالیستی از فعالیت ارگانیسم ها در اکسید کردن مواد آلی و معدنی و تولید انرژی بسیار مورد توجه قرار گرفتند.

همچنین این هدف می تواند با جایگزین کردن یک سیستم غیربیولوژیکی که در آن اکسیداسیون مواد آلی منجر به تولید برق شود نیز انجام گردد. این امر ممکن است با استفاده از پیل الکتروشیمیایی که با یک راکتور فتوکاتالیستی ترکیب شده است، به دست آید. این فرایند قادر است در حضور ذرات TiO_2 و تابش UV خورشیدی (و در غیاب اکسیژن)، اکسیداسیون ماده آلی (بعنوان عامل فداشونده) (واکنش (۲)) و کاهش یون فلزی در محلول (واکنش (۳)) انجام شود.

(۱)
$$TiO_2 \xrightarrow{hv} h^+ + e^-$$

(۲)
$$ORG + h_{vb}^+ \rightarrow ORG^+$$

(۳)
$$M^{(n+1)+} + e^- \rightarrow M^{(n)+}$$

ساده ترین راه دستیابی به این نوع دستگاه، آن است که یک پیل الکتروشیمیایی که در آن جفت اکسایشی-کاهشی یکسان $\left(M^{(n+1)} / M^{(n)+}\right)$ در هر دو نیمه اما در غلظت های مختلف باشد مورد استفاده قرار گیرد. مشخص است که این دستگاه تا زمانی که غلظت های گونه های فعال در هر دو بخش مساوی شود، قادر به تولید خروجی الکتریکی است.

واکنش های زیر در هنگام کارکرد پیل صورت می گیرد:

(۳) کاتد: $M^{(n+1)+} + e^- \rightarrow M^{(n)+}$

(۴) آند : $M^{(n)+} \rightarrow M^{(n+1)+} + e^-$

زمانی که سیستم به تعادل می‌رسد، جریان در مدار خارجی متوقف می شود مگر اینکه یون‌های فلزی در حالت پایین و بالا اکسیداسیون به ترتیب در آند و کاتد دوباره ذخیره شوند.

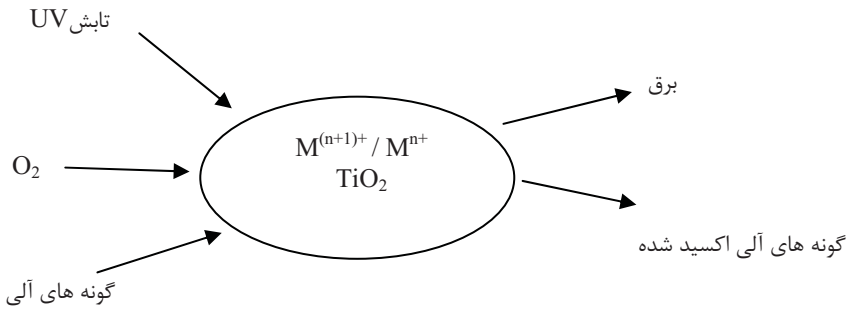
هنگامی که پیل تخلیه شد، در محلول آندی، غلظت گونه $M^{(n)+}$ با کاهش یون‌های $M^{(n+1)+}$ (واکنش (۳)) افزایش می یابد. این امر با اکسیداسیون همزمان عامل فداشونده (واکنش (۲)) با شرکت در یک فرایند فتوکالیستی انجام پذیر است. اکسیداسیون دوباره یون های $M^{(n)+}$ در محفظه کاتدی ممکن است به سادگی از طریق تغذیه مداوم جریان هوا به آن به دست آید.

(۵)
$$M^{(n)+} \xrightarrow{O_2} M^{(n+1)+}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

در نتیجه، سیستم کلی ممکن است به صورت شکل (۱) نمایش داده شود. دستگاه به طور کلی به صورت سیستمی عمل می کند که با اکسیژن، یک ماده آلی و تابش UV تغذیه می شود و خروجی های آن برق و گونه های آلی اکسید شده (یا مخلوطی از محصولات اکسیدی) می باشد.

بنابراین، دستگاه پیشنهادی اجازه می دهد که گونه آلی (به طور غیر مستقیم) با اکسیژن اکسید شده و برق را تولید کند. در این مفهوم می‌توان آن را به عنوان پیل سوختی دسته بندی کرد. با این حال، از آنجایی که این کار براساس فرایند فتوکاتالیستی (لزوم دوباره پرکردن $M^{(n)+}$ در آند پیل) انجام می شود، دقیق تر آن است که به صورت پیل سوختی فوتوکاتالیستی (خورشیدی) براساس TiO_2 نشان داده شود. در کار حاضر، دستگاه به صورتی که در بالا توضیح داده شد، براساس سیستم Cu^{+2}/Cu^{o} می باشد. تحقیقات گسترده ای بر روی فرایند فتوکاتالیستی فداشونده در حضور یون‌های Cu^{2+} درگذشته انجام شده است [۱۷،۸،۱۰،۷،۵]. دو سیستم کاتدی مختلف و عوامل فداشونده متفاوت در این مقاله بررسی شده اند.



شکل ۱) سیستم بکار رفته در این مقاله

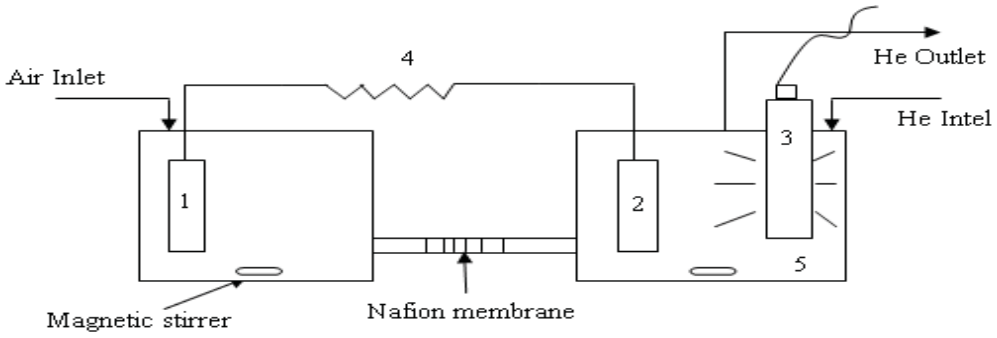
مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها با استفاده از یک راکتور فتوکاتالیستی و یک پیل H- شکل الکتروشیمیایی اصلاح شده (شکل (۲)) انجام شد. این پیل، متشکل از دو محفظه با آند ساخته شده از یک الکترود مس فلزی، با یک مساحت سطح $40cm^2$ و یک محلول حاوی سولفات مس می باشد. دو کاتد مختلف در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. اولین کاتد مشابه آند و دومین یک الکترود O_2 است. این الکترود یک سیم بی اثر پوشیده شده با یک لایه نازک جداکننده پلاتینی (پلاتین سیاه) است که در یک محلول آبی دارای جریان هوا وارد شده است. آند و کاتد از طریق یک غشای تبادل یونی کاتیونی متصل شده اند. یک لامپ UV پرفشار با نشر امواج در طول موج ۳۰۵، ۳۱۳ و ۳۶۶ نانومتر، در نزدیکی شیشه قرار دارد و در راکتور فتوکاتالیستی یا در آند پیل فتوالکتروشیمیایی به کار می‌رود. لامپ و محفظه آندی با فویل آلومینیومی پوشیده شده است تا اپراتور را از تابش امواج محافظت نماید. یک جریان هلیم به داخل محلول راکتور به منظور جلوگیری از حل شدن اکسیژن هوا در طی کاهش فتوکاتالیستی یونهای Cu^{2+} در حضور ترکیب آلی به عنوان عامل فداشونده تغذیه می شوند. غلظت یون‌های Cu^{2+} در طی آزمایش‌ها با استفاده از روش فتومتری با استفاده از کیت آنالیزی براساس اگزالیک اسید

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

بیس-سیکلوهگزیدین هیدرازید (کوپرازون) که تنها Cu^{2+} را شناسایی می کند، انـدازه گیـری شـد. فرمیـک اسـید (FA)، گلیسرول (GLY) و گلوکز (GLU) به عنوان عامل فداشونده به کار رفت. غلظـت هـای FA، GLY و GLU در زمـان های مختلف واکنش با آنالیزگر HPLC تعیین شد. بدین منظور، HPLC مجهز به شناسـاگر UV-vis (λ =۲۱۵ nm) و ستون خروج یونی با استفاده از فازمتحرک سولفوریک اسید $۲/۵\times۱۰^{-۳}$ $mol.L^{-1}$ بود که با سرعت ۰/۶ $mL.min^{-1}$ جاری می شد.

ولتاژ مدار باز (OCV) و ولتاژ پیل (E_{cell}) توسط یک مولتی متـر عـددی (DMM) انـدازه گیـری شـد. اکـسیداسیون GLU در طی فرایند فتوکاتالیستی با اندازه گیری COD دنبال شد. pH با افزودن پرکلریک اسـید و سـدیم هیدروکـسید تنظیم شد.



شکل ۲) پیل فتوالکتروشیمیایی. (۱) الکترود مس یا پلاتین سیاه، (۲) الکترود مس، (۳) لامپ UV، (٤) مقاومت، (۵) سوسپانسیون TiO_2

نتایج و بحث

پیل فتوشیمیایی با کاتد جفت اکسایشی ـ کاهشی Cu^{+2}/Cu^{o}

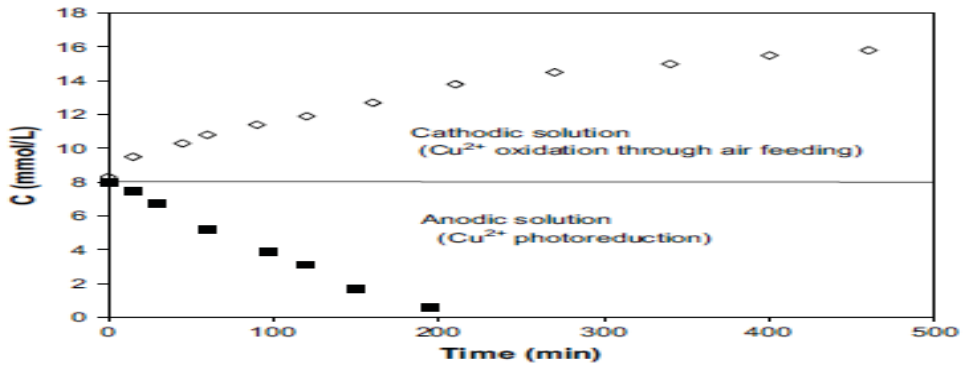
یک محلول آبی در pH = ۲/۰ با غلظت ۰/۸ mmol/L Cu^{2+} به دو بخش مساوی تقسیم شد. بخش اول به محفظـه کاتدی پیل ریخته شد که در آنجا یک جریان هوا وارد شده تا Cu^{o} (در الکترود) بـه Cu^{2+} اکـسید شـود و غلظتـی حـدود ۱۶ mmol/L به دست آید. بخش دوم محلول در آند پیل با افزودن TiO_2 , FA در غلظت هایی به ترتیـب ۰/۸ g/L و ۸mmol/L قرار داده شد. لامپ UV روشن شد تا کاهش فوتوکاتالیـستی یـون‌هـای Cu^{2+} انجـام شـود. در اثـر فراینـد فوتوکاتالیستی، یون‌های Cu^{2+} به Cu^{o} کاهش داده شد و به صورت سوسپانسیون در محلـول بـاقی مانـد، تـا اینکـه FA اکسید شود. معدنی شدن کامل با اندازه گیری TOC تعیین گردید. واکنش هایی که در ایـن مرحلـه در محلـول آنـدی رخ داده است به همراه واکنش (۱) به قرار زیر است:

$$Cu^{2+} + e^{-} \rightarrow Cu^{+} + e^{-} \xrightarrow{\text{سریع}} Cu^{\circ} \qquad (۶)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

$$h^+ + HCOOH \rightarrow HCOO^{\bullet} + H^+ \xrightarrow{h^+ / \text{سریع}} CO_2 + 2H^+ \quad (۷)$$

غلظت های Cu^{2+} در دو محفظه برحسب زمان در شکل (۳) نشان داده شده است. در پایان این دو فرایند، غلظت Cu^{2+} در دو محفظه متفاوت بود. بنابراین، OCV پیل معادل ۳۱/۲ mV اندازه گیری شد. نتایج گزارش نشان می دهد که دستگاه پیشنهادی (پیل فتوالکتروشیمیایی) توانایی تولید ولتاژ الکتریکی (با استفاده از تابش UV، جریان هوا و ماده آلی) را دارد.



شکل ۳) غلظت یون‌های مس طی مدت فرآیند شارژ (کاتد:الکترود Cu^{2+}/Cu^0 در محلول)

این دستگاه از یک سیستم کاملاً تخلیه (دو بخش محلول آبی آغازی کاملاً غلظت های یکسان داشته و در دو محفظه پیل نمی توانست هیچ ولتاژی تولید شود) آغاز به کار کرد. اگر الکترودهای این پیل از طریق مدار خارجی که دارای مقاومت باشد (R_{est} =۴۶۰۰ Ω) متصل شود، ولتاژ پیل (E_{cell}) معادل ۲۰ mV به دست می آید. این مقدار به عنوان درآمد حاصل از فرایند تخلیه، کاهش خواهد یافت تا زمانی که غلظت یون‌های Cu^{+2} در دو محفظه برابر شود، به صفر خواهد رسید. از روی ولتاژ اندازه گیری شده، مقاومت داخلی (R_{int}) پیل به صورت زیر می‌تواند محاسبه شود [۱۲]:

$$R_{\text{int}} = R_{est}\left(\frac{OCV}{E_{cell}} - 1\right) = 2576\Omega$$

در کنار آن، خروجی قدرت در آغاز فرایند تخلیه:

$$P = E_{cea} I = \frac{E_{cell}^{۲}}{R_{est}} = ۸/۶۹ \times ۱۰^{-۵} \quad mW$$

و دانسیته قدرت:

$$P_A = \frac{P}{A} = \frac{E_{Cell}^{۲}}{R_{est} A} = ۲/۱۷ \times ۱۰^{-۲} \quad \frac{mW}{m^{۲}}$$

A مساحت سطح الکترود است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

مقادیر محاسبه شده پیل سوختی به نظر می رسد به طور قابل توجهی کمتر از مقادیر گزارش شده بـرای دسـتگاههایی مانند میکروبی باشد.

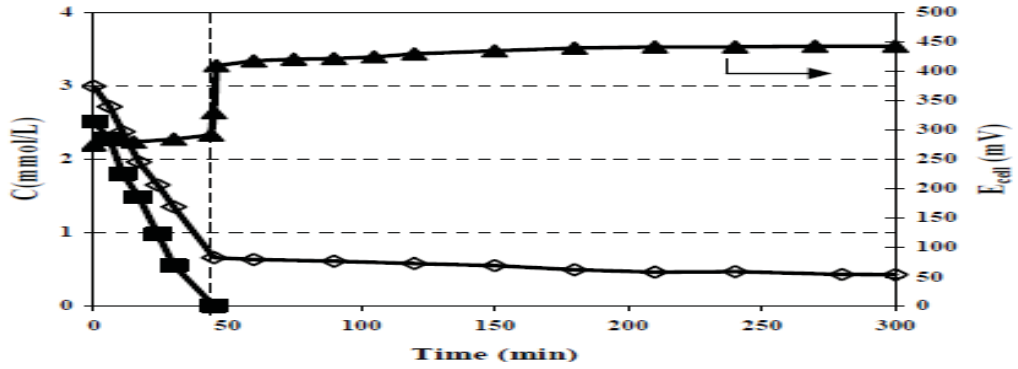
برای دستیابی به مقادیر بالاتری از قدرت و دانسیته قدرت، مناسب برای کاربردهـای عملـی، سیـستم هـای شـیمیایی مختلفی برای محفظه کاتدی باید انتخاب شوند که امکان OCV های بالاتر وجود داشته باشد.

پیل فتوشیمیایی با کاتد الکترود O_2

در ادامه پژوهش، کاتد Cu^{2+}/Cu^0 با یک الکترود O_2 جایگزین شد و آند به همان صورت قبلی باقی ماند. واکنش هـا در این پیل به صورت زیر عمل می کند.

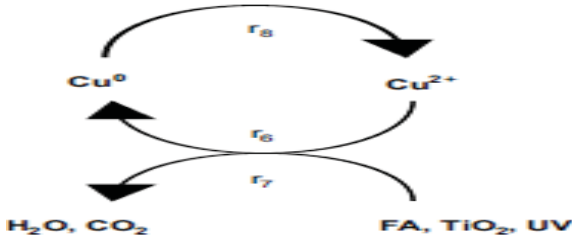
آند : $$Cu^0 \rightarrow Cu^{2+} + 2e^- \quad (٨)$$

کاتد: $$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \quad (٩)$$



شکل ٤) فرایند شارژ در پیل الکتروشیمیایی (کاتد: الکترود O_2)،
◊: FA، ■: یون‌های Cu^{2+}، ▲: E_{cell}

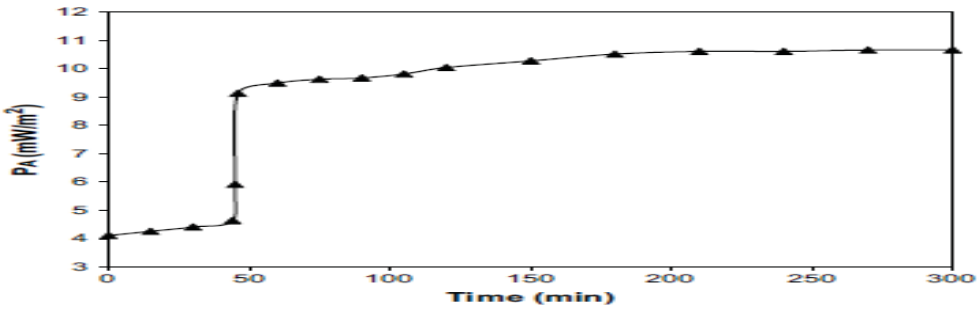
مشاهده اخیر با این حقیقت سازگار است که وقتی پیل الکتروشیمیایی کار می کند در محلـول آنـدی، Cu^0 بـه آرامـی اکسید شده و یون‌های Cu^{2+} تولید می کند که به سرعت به واسطه فرایند فتوکاتالیستی با اکـسیداسیون همزمـان FA بـه صورت نشان داده شده در شکل (۵) به Cu^0 کاهش می یابد.



شکل ٥) چرخه اکسیداسیون/ احیا همزمان مس و ماده آلی

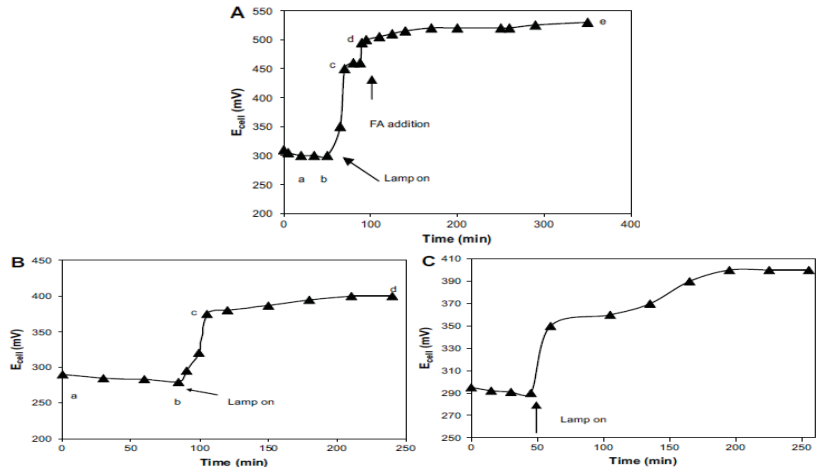
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

براساس داده های شکل (۴)، دانسیته قدرت محاسبه و برحسب زمان رسم شده است (شکل ۶). لازم به تاکید است که بالاترین مقدار بدست آمده با این وسیله (mW/m^2 ۱۰/۵) از نظر توانی با موارد گزارش شده برای پیل های میکروبی یکسان است.



شکل ٦) دانسیته قدرت در پیل الکتروشیمیایی (کاتد: الکترود O_2) در حضور FA

برای شناسایی بهتر رفتار این سیستم، یک آزمایش جدید در pH= ۲ بدون افزودن سولفات مس در حضور سوسپانسیون TiO_2 (۰/۸ g/L) و FA ۲/۰ mmol/L (شکل ۷A) انجام شد. اولین قسمت منحنی ولتاژ (شکل ۷A منحنی a-b) تخلیه پیل را وقتی که مدار خارجی بسته است (۴۶۰۰ Ω) نشان می دهد. در این فاز، سیستم به صورت یک پیل الکتروشیمیایی بدین صورت که در آند مس به آرامی به یون های Cu^{2+} اکسید شده و در محلول رها می شود کار می کند. وقتی که لامپ روشن شد، فتوکاهش مس آغاز شده و در نتیجه ولتاژ پیل افزایش می یابد (۷A منحنی b-c). افزودن دومین مقدار از فرمیک اسید غلظت آن را به ۴/۰ mM رساند که فوراً یک افزایش جدیدی در ولتاژ پیل تا ۵۳۰ mV را به دنبال داشت (شکل ۷A منحنی c-d-e). نتیجه اخیر به وضوح نشان می دهد که ولتاژ پیل به شدت به غلظت ماده آلی در محلول مرتبط است.



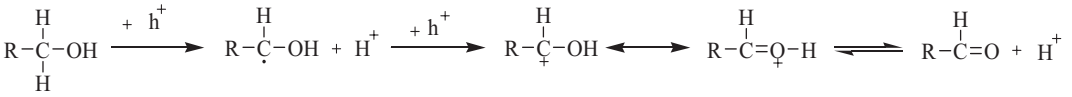
شکل ۷) تغییرات ولتاژ پیل در فرایند شارژ پیل الکتروشیمیایی در حضور FA، GLY و GLU بدون افزودن یون‌های Cu^{2+} (کاتد: الکترود O_2) (A) $[FA]_0$ =۲/۰ mmol/L، (B) $[GLY]_0$ =۱/۰ mmol/L، (C) $[GLU]_0$ =۱/۰ mmol/L

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

عوامل فداشونده دیگر

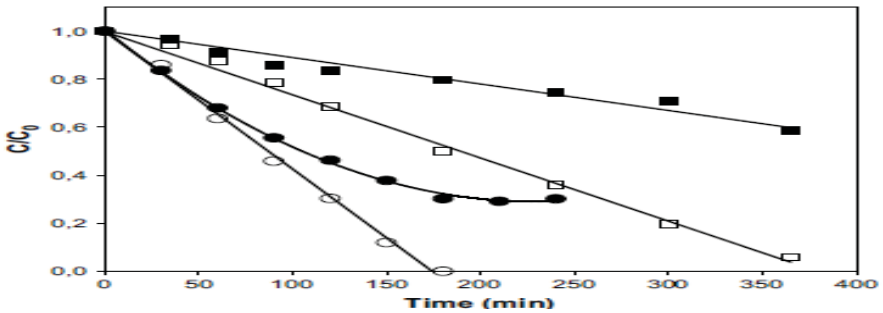
در آزمایش‌های فوق، FA به عنوان عامل فداشونده نتایج رضایت بخشی را نشان داد. با این حال، شناسایی گونه های فداشونده دیگر که بتواند در طی فتوکاهش یون‌های مس اکسید شوند و عمدتاً در پساب نیز وجود داشته باشد مورد جستجو قرار گرفت. با این هدف، مجموعه ای از واکنش های اکسایشی گونه های آلی در حضور یون های Cu^{2+} ، TiO_2 و تابش UV در یک راکتور عاری از اکسیژن و با استفاده از حباب های هلیم انجام شد.

گونه‌های انتخاب شده در این تحقیق براساس پیشنهادهای مقایسه‌ای [۵] بود که الکل ها و آلدهیدها، مناسب ترین مواد آلی برای کاهش فتوکاتالیستی مس در حضور UV و ذرات TiO_2 بوده و قابل انجام در پساب واقعی هستند. پس از این معیارها، گلیسرول، محصول جانبی در فرایند تولید بیودیزل، و گلوکز به عنوان آلاینده هایی که باید از پساب (به طور جزیی یا کامل) حذف شوند، انتخاب شدند. این دو گونه به دلیل حضور گروه‌های الکلی، در دسته الکل ها و تنها گلوکز با داشتن گروه آلدهیدی جزو گروه آلدهیدی شناسایی شدند. یک مکانیسم که قادر به تشریح واکنش الکل ها [۱۴] بعد از تابش UV و TiO_2 باشد، در شکل زیر نشان داده شده است.



آلدهید، RCHO، که محصول اکسیداسیون الکل است، ممکن است با مکانیسم مشابه از طریق هیدراته شدن نیز اکسید شود.

برای هر سیستم انجام شده در این کار، اکسیداسیون مولکول آلی توسط کاهش Cu^{2+} به Cu^{o} (که در محلول معلق بوده) صورت گرفت (واکنش ۶). در شکل (۸)، کاهش نمودار غلظت- زمان وقتی گلیسرول (دایره پر) به عنوان عامل فداشونده در فتوراکتور مشاهده گردید. با توجه به حضور گروه های مختلف با قابلیت اکسید شدن، یون های Cu^{2+} (دایره خالی) بیشتری به ازای هر مولکول گلیسرول کاهش یافت.



شکل ۸) کاهش مس در حضور گلیسرول و گلوکز در فتوراکتور.
اجرای ۱: $[GLY]_0$ =۸/۰ mmol/L، $[Cu^{2+}]$ =۸/۰ mmol/L
●: GLY، ○: یون های Cu^{2+}؛ اجرای ۲: $[GLU]_0$ =٤/٠ mmol/L، $[Cu^{2+}]$ =١٦ mmol/L، ■: GLU
(گزارش شده به صورت COD/COD_0)، □: یون‌های Cu^{2+}

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

در شکل (۷B)، داده های جمع آوری شده در آزمایش پیل فتوالکتروشیمیایی در حضور گلیسرول در محلول آندی بدون افزودن سولفات مس نشان داده شده است.

همانطوریکه قبلاً در آزمایش FA مشاهده شد، قسمت اول (a-b) منحنی در شکل (۷B)، تخلیه پیل را نشان می دهد برای وقتی که مدار خارجی (R_{est} =۴۶۰۰ Ω) بسته است. بعد از ۸۰ دقیقه، لامپ روشن شد و فرایند شارژ با افزایش تند E_{cell} (شکل ۷B، منحنی b-c) به واسطه مصرف سریع Cu^{2+} (حاصل از اکسیداسیون الکترود) و کاهش آن به Cu^{o} با مصرف همزمان ماده آلی آغاز شد. سپس فرایند شارژ (شکل ۷B منحنی c-d) به واسطه غلظت بسیار کم Cu^{2+} حاضر آهسته شد، تا اینکه متوقف شد. در این فاز، یون‌های Cu^{2+} موجود برای فرایند تنها یون‌هایی هستند که توسط کارکرد پیل تولید شدند (شکل ۲). نتایج مشابه با استفاده از گلوکز به عنوان عامل فداشونده مشاهده شد. شکل (۸) نشان می دهد که فتوکاهش یون‌های Cu^{2+} (مربع خالی) در حضور گلوکز نیز پردازش شده و میزان مصرف آن توسط کاهش COD (مربع پر) محاسبه گردید. مورد جالب مشاهده شده این است که در مورد گلوکز با وجود مقدار اضافی مولار یون‌های Cu^{2+} نسبت به گلوکز (۴= [گلوکز]/[Cu^{2+}]) تقریباً کاهش کامل Cu^{o} به دست آمد. این نتیجه نشان می دهد یک مولکول گلوکز توانایی کاهش بیش از یک مولکول Cu^{2+} را دارد. این سیستم شیمیایی در یک اجرا با استفاده از پیل فتوالکتروشیمیایی با ثبت نمودار ولتاژ پیل- زمان (شکل ۷C) قابل مقایسه با مورد بدست آمده از گلیسرول است.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از این کار نشان می دهد که ترکیب یک راکتور فتوکاتالیستی و پیل الکتروشیمیایی برای دستیابی به حذف همزمان آلاینده های آلی از محلول آبی و تولید برق امکان‌پذیر است. این امر با بهره گیری از قابلیت کاهش یون‌های Cu^{2+} در حضور TiO_2، تابش UV (خورشیدی) و یک عامل فداشونده آلی انجام می گیرد. امکان استفاده از عوامل فداشونده دیگر مانند فرمیک اسید، گلیسیرین و گلیسرول در این پژوهش به اثبات رسید. با وجود به دست آمدن نتیجه مشخص در حالات قدرت و دانسیته قدرت با سیستم Cu^{2+}/Cu^{0} و با استفاده از الکترود اکسیژن برای محفظه کاتدی، تحقیقات بیشتری برای رسیدن به هدف حذف همزمان آلاینده آلی از آب و تولید برق با قدرت الکتریکی مناسب برای کاربردهای عملی، ضروری است.

منابع

[1] Alzate-Gaviria, L.M. et al. 2007, Comparison of two anaerobic systems for hydrogen production from the organic fraction of municipal solid waste and synthetic wastewater. Int. J. Hydrogen Energy, 32 (15), PP. 3141–3146.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

[2] Canterino, M. et al. 2008, Kinetic investigation of Cu(II) ions photoreduction in presence of titanium dioxide and formic acid. Water Res., 42 (17), PP. 4498–4506.

[3] Canterino, M. et al. 2009, Energy recovery in wastewater decontamination: Simultaneous photocatalytic oxidation of an organic substrate and electricity generation. Water Res., 43, PP. 2710–2716.

[4] Feng, Y. et al. 2008, Brewery wastewater treatment using air–cathode microbial fuel cells. Appl. Microbiol. Biotechnol., 78 (5), PP. 873–880.

[5] Foster, N.S. et al. 1995, Effect of organics on the photodeposition of copper in titanium dioxide aqueous suspensions. Industrial and Engineering Chemistry Research, 34 (11), PP. 3865–3871.

[6] Kim, B.H. et al. 2007, Challenges in microbial fuel cell development and operation. Appl. Microbiol. Biotechnol., 76 (3), PP. 485–494.

[7] Kanki, T. et al. 2004, Photocatalytic reduction and deposition of metallic ions in aqueous phase. Chem. Eng. J., 97 (1), PP. 77–81.

[8] Krysa, J. et al. 2006, Photocatalytic degradation of model organic pollutants on an immobilized particulate TiO2 layer role of adsorption processes and mechanistic complexity. Appl. Catal., B, 64 (3–4), PP. 290–301.

[9] Kuhn, H.J. et al. 2004, Chemical actinometry (IUPAC Technical Report). Pure Appl. Chem., 76 (12), PP. 2105–2146.

[10] Kyung, H. et al. 2005, Simultaneous and synergistic conversion of dyes and heavy metal ions in aqueous TiO2 suspensions under visible-light illumination. Environ. Sci. Technol., 39 (7), PP. 2376–2382..

[11] Logan, B.E. 2005, Simultaneous wastewater treatment and biological electricity generation. Water Sci. Technol., 52 (1–2), PP. 31–37.

[12] Logan, B.E. et al. 2006. Microbial fuel cells: methodology and technology. Environ. Sci. Technol., 40 (17), PP. 5181–5192.

[13] Min, B. et al. 2005, Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. Water Res., 39 (9), PP. 1675–1686.

[14] Minero, C. et al. 2000, Photocatalytic transformation of organic compounds in the presence of inorganic ions. 2. Competitive reactions of phenol and alcohols on a titanium dioxide_fluoride system. Langmuir, 16 (23), PP. 8964–8972.

[15] Tilche, A. and Galatola, M. 2008, The potential of bio-methane as biofuel/bio-energy for reducing greenhouse gas emissions: a qualitative assessment for Europe in a life cycle perspective. Water Sci. Technol., 57 (11), PP. 1683–1692.

[16] Venkata Mohan, S. et al. 2008, Simultaneous biohydrogen production and wastewater treatment in biofilm configured anaerobic periodic discontinuous batch reactor using distillery wastewater. Int. J. Hydrogen Energy, 33 (2), PP. 550–558.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]