Original Article

Feasibility of formaldehyde removal from aqueous solutions by advanced oxidation process (UV/H_2O_2)

Hasanbeiki O[1], Miranzadeh M[2*], Mostafaei GhR[2], Rabbani D[2], Akbari H[3]

1- Student Research Committee, Kashan University of Medical Sciences, Kashan, I. R. Iran.
2- Department of Environmental Health, Faculty of Health, Kashan University of Medical Sciences, Kashan, I. R. Iran.
3- Trauma Research Center, Faculty of Health, Kashan University of Medical Sciences, Kashan, I. R. Iran.

Received November 10, 2012; Accepted February 20, 2013

Abstract:

Background: Formaldehyde is usually used as a raw material in many industrial processes. High levels of formaldehyde may be found in effluent of the industries. Formaldehyde appears to have the potential for DNA damage, cell mutagenicity and carcinogenicity. This study aimed to investigate the feasibility of formaldehyde removal from aqueous solutions by advanced oxidation process (UV/H_2O_2).

Materials and Methods: This bench-scale experimental study was conducted on aqueous solution containing 5000 mg/L of formaldehyde at the Pyrex reactor (16 cm width, 16 cm length and 26 cm depth). Experiments were conducted at two stages. First, the optimum pH and H_2O_2 concentration were determined. Then, the effect of the radiation was studied.

Results: The rates of formaldehyde removal (pH=3 and 60 minutes reaction time) at different concentrations of H_2O_2 (0.4, 0.5, 0.6 and 0.7 mol/L) were 47%, 70%, 61% and 62%, respectively.

Conclusion: UV/H_2O_2 can be used as an efficient process in removing high levels of formaldehyde. The optimum process conditions were: pH=3, a reaction time of 60 minutes and H_2O_2concentration of 0.5 mol/L.

Keywords: Formaldehyde, Advanced oxidation process, UV/H_2O_2, Hydrogen peroxide

* **Corresponding Author.**
Email: miranzadeh_mb@kaums.ac.ir
Tel: 0098 361 555 5155
Fax: 0098 361 555 5155

Conflict of Interests: ***No***

Feyz, Journal of Kashan University of Medical Sciences January, 2014; Vol. 17, No 6, Pages 568-574

Please cite this article as: Hasanbeiki O, Miranzadeh M, Mostafaei GhR, Rabbani D, Akbari H. Feasibility of formaldehyde removal from aqueous solutions by advanced oxidation process (UV/H_2O_2). ***Feyz*** 2014; 17(6): 568-74.

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-11-23]

امکان سنجی حذف فرمالدئید از محلول‌های آبی توسط فرایند اکسیداسیون پیشرفته (UV/H_2O_2)

ام‌البنین حسن بیکی [۱]، محمدباقر میرانزاده [۲*]، غلامرضا مصطفایی [۳]، داورخواه ربانی [۳]، حسین اکبری [٤]

خلاصه:

سابقه و هدف: فرمالدئید به‌طور معمول به‌عنوان ماده خام در بسیاری از فرآیندهای صنعتی به‌کار برده می‌شود. در فاضلاب این صنایع ممکن است غلظت‌های بالایی از فرمالدئید یافت شود. این آلدئید در اکثر موارد باعث آسیب DNA، جهش‌زایی در سلول‌ها و هم‌چنین سرطان‌زایی می‌گردد. مطالعه حاضر با هدف امکان سنجی حذف فرمالدئید از محلول‌های آبی توسط فرایند اکسیداسیون پیشرفته (UV/H_2O_2) انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها: این مطالعه تجربی بر روی محلول آبی حاوی فرمالدئید با غلظت ۵۰۰۰ mg/L در راکتور بسته از جنس پیرکس با ابعاد ۲٦×۱٦×۱٦ سانتی‌متر انجام گرفت. آزمایش‌ها در دو مرحله انجام گردید. در مرحله اول، pH و غلظت H_2O_2 بهینه فرآیند بررسی شده و در مرحله بعد اثر مدت زمان تابش اشعه مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج: درصد حذف فرمالدئید در pH=۳ و زمان ٦۰ دقیقه و با افزودن H_2O_2 با غلظت ۰/٤ و ۰/۵ مول در لیتر، به‌ترتیب به میزان ٤۷ و ۷۰ درصد به‌دست آمد. در همان شرایط با افزودن H_2O_2 با غلظت ۰/٦ و ۰/۷ مول در لیتر، میزان حذف فرمالدئید به ترتیب برابر ٦۱ و ٦۲ درصد گردید.

نتیجه‌گیری: فرآیند اکسیداسیون پیشرفته UV/H_2O_2 می‌تواند به‌عنوان روشی کارا جهت حذف غلظت‌های بالای فرمالدئید استفاده گردد. شرایط بهینه بهره‌برداری شامل مدت زمان واکنش ٦۰ دقیقه، pH بهینه ۳ و غلظت H_2O_2 به میزان ۰/۵ مول در لیتر می‌باشد.

واژگان کلیدی: فرمالدئید، فرایند اکسیداسیون پیشرفته، UV/H_2O_2، آب اکسیژنه

دو ماه‌نامه علمی- پژوهشی فیض، دوره هفدهم، شماره ٦، بهمن و اسفند ۱۳۹۲، صفحات ۵۷٤-۵٦۸

مقدمه

امروزه منابع آبی به‌دلیل افزایش جمعیت، تغییرات آب و هوایی و آلودگی‌های زیست محیطی با محدودیت روبرو هستند. یکی از دلایل این آلودگی‌ها تخلیه پساب‌های صنعتی حاوی مواد شیمیایی آلی و معدنی به اکوسیستم‌های طبیعی است [۱]. فرمالدئید به‌دلیل واکنش‌پذیری، ماهیت بی رنگ، پایداری و هزینه کم به‌وفور در بسیاری از فرآیندهای صنعتی [۲] نظیر کارخانجات تولید رزین فنول-فرمالدئید و اوره-فرمالدئید [۳]، چسب [۵-۳]، عکاسی، داروسازی [٦-٤]، چرم [۷-٤]، پلاستیک، تولید گندزداها و صنایع پتروشیمی [٦-٤] به‌کار برده می‌شود.

در فاضلاب این صنایع ممکن است غلظت‌های بالایی از فرمالدئید در محدوده ۲۰۰ تا ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر یافت شود [۹،۸]. متأسفانه این ماده می‌تواند خطراتی را در محیط‌های آبی حتی با غلظت کمتر از ppm ۱ ایجاد کند [۱۰]. این آلدئید برای موجودات زنده سمی است و با اتصال به گروه آمین پروتئین‌ها از فعالیت فیزیولوژیکی سلول‌ها جلوگیری کرده [۳] و باعث آسیب DNA، جهش‌زایی در سلول‌ها و سرطان‌زایی می‌گردد [۱۳-۱۱،۳]. بنابراین، فاضلاب قبل از تخلیه به محیط زیست باید به‌طور موثری مورد تصفیه قرار گیرد [۱٤]. مشکل اصلی کاربرد فرآیندهای بیولوژیکی زمانی است که با فاضلاب صنعتی حاوی غلظت‌های بالای فرمالدئید در حدی بیش از ظرفیت راکتورهای بیولوژیکی (g/L ۲-۱/۵) مواجه هستیم. در حقیقت به‌دلیل بازدارندگی غلظت‌های بالای فرمالدئید بر متابولیسم میکروبی کاربرد فرآیندهای بیولوژیکی با مشکل مواجه می‌شود. رویکرد عمومی جهت برخورد با این مشکل استفاده از یک فرآیند پیش تصفیه به‌منظور تجزیه ترکیب بازدارنده به سطوحی می‌باشد که تصفیه بیولوژیکی بعدی امکان‌پذیر باشد. در میان فرآیندهای پیش تصفیه، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) بیشترین کاربرد را دارند که با تولید رادیکال‌های بسیار فعال به‌ویژه $^{\bullet}OH$ با پتانسیل اکسایندگی ۲/۸ V در طی واکنش‌ها همراه می‌باشد

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی کاشان

[۲] استاد، گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کاشان

[۳] استادیار، گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کاشان

[٤] مربی، مرکز تحقیقات تروما، دانشگاه علوم پزشکی کاشان

*** نشانی نویسنده مسئول:**

کاشان، کیلومتر ۵ بلوار قطب راوندی، دانشگاه علوم پزشکی کاشان، دانشکده بهداشت، گروه بهداشت محیط

تلفن: ۰۳٦۱۵۵۵۵۱۵۵ **دورنویس:** ۰۳٦۱۵۵۵۵۱۵۵

پست الکترونیک: miranzadeh_mb@kaums.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۱/۸/۲۰ **تاریخ پذیرش نهایی:** ۹۱/۱۲/۲

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-11-23]

[۱۶،۱۵]. این رادیکال‌ها با حمله به مولکول‌های آلی آن‌ها را به کربن دی اکسید و آب تجزیه می‌کنند [۱۷]. در یک فرآیند AOP رادیکال تولید شده به‌صورت غیر انتخابی به ترکیبات سمی چسبیده و آن‌ها را به ترکیبات واسطه‌ای تبدیل می‌کند که از طریق فرآیندهای متداول بیولوژیکی قابل حذف هستند. بنابراین استفاده از فرآیند AOP قبل از تصفیه بیولوژیکی می‌تواند یک تکنولوژی کارا و انعطاف‌پذیر برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی غلظت‌های بالای فرمالدئید باشد [۱۶]. تا کنون فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مختلفی نظیر روش الکتروشیمیایی [۱۸]، واکنش شبه فنتون [۱۹]، الکتروفنتون [۱٤] و روش ترکیبی $O_3/MgO/H_2O_2$ [۲۰] جهت حذف فرمالدئید به‌کار رفته است. کاربرد این روش‌ها مشکلاتی چون افزایش هزینه‌های بهره‌برداری به‌دلیل استفاده از ازن و هم‌چنین تولید لجن حاصل از فرآیند الکتروشیمیایی را به همراه دارد. امروزه توجه چشم‌گیری به روش UV/H_2O_2 به‌عنوان یک فرآیند AOP کم هزینه و دارای راندمان بالا جهت حذف آلاینده‌های آلی و مقاوم فاضلاب معطوف شده است. H_2O_2 به‌عنوان اکسید کننده‌ای قوی برای کاهش سطوح کم آلاینده‌های موجود در فاضلاب به‌کار می‌رود [۲۱] و به‌تنهایی قادر به اکسیداسیون مواد مقاوم نمی‌باشد، اما کاربرد آن به‌همراه پرتوتابی UV در طول موج کوتاه‌تر از ۳۰۰ nm می‌تواند سبب تولید رادیکال هیدروکسیل گردد:

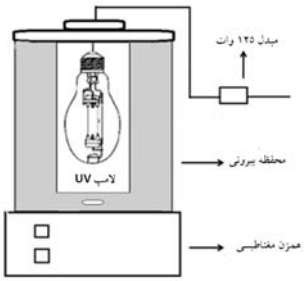
$$H_2O_2 + h\nu \rightarrow 2^{\bullet}OH$$

مزیت استفاده از روش UV/H_2O_2 در مقایسه با سایر روش‌ها شامل موارد زیر است: محلول بودن H_2O_2 در آب؛ تولید مؤثر رادیکال $^{\bullet}OH$؛ عدم انتشار آلودگی هوا؛ سیستم مکانیکی ساده؛ میزان پراکسید باقیمانده بسیار کم و عدم نیاز به فرایند جداسازی پس از تصفیه [۱۹،۱٦] در طی دهه گذشته تجربیات نشان داده است که این تکنیک جهت تصفیه فاضلاب آلوده به طیف وسیعی از آلاینده‌های صنعتی بسیار مؤثر است. در یک مطالعه از روش UV/H_2O_2 برای حذف COD فاضلاب صنایع استخراج نفت استفاده گردید. این روش توانست مقادیر ۱۰۰۰، ٤۰۰۰ و ۲۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر از COD اولیه را به‌ترتیب به‌میزان ۹۰، ۵۵ و ۳۹ درصد حذف کند [۲۲]. در سال ۲۰۱۲ با کاربرد روش مزبور توانستند ۸۱ درصد رنگ و ۷۳ درصد از COD شیرابه زباله کهریزک تهران را حذف نمایند [۲۳]. مطالعه حاضر با هدف امکان سنجی حذف فرمالدئید از محلول آبی توسط فرایند اکسیداسیون پیشرفته (UV/H_2O_2) انجام گرفته است. در حذف فرمالدئید تأثیر عوامل مؤثر در فرآیند شامل زمان تابش نور UV، مقدار H_2O_2 و pH ارائه خواهد گردید.

مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر به‌صورت تجربی در مقیاس آزمایشگاهی بر روی محلول آبی حاوی غلظت ۵۰۰۰ mg/L فرمالدئید انجام گرفت. جهت تهیه محلول آبی از محلول فرمالین حاوی فرمالدئید ۳۷ درصد استفاده گردید. محلول‌های فرمالین، H_2O_2 و دیگر مواد شیمیایی و معرف‌ها از شرکت Merck خریداری شد. برای تهیه تمامی محلول‌ها از آب مقطر تولیدی از دستگاه آب مقطر دیونایزر استفاده گردید. رآکتور آزمایش از جنس پیرکس و به صورت مکعبی با ارتفاع ۲٦ سانتی‌متر و سطح مقطع ۱٦×۱٦ سانتی‌متر بود و در داخل آن مکعب دیگری از همان جنس با ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و سطح مقطع ۱۰×۱۰ سانتی‌متر جای گرفته بود. شکل شماره ۱ شماتیکی از راکتور مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. در مکعب کوچک‌تر لامپ UV و در اطراف آن نمونه با حجم ۱ لیتر قرار داشت. تمامی آزمایش‌ها در دمای ۳±۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. یک سیستم خنک‌کننده به‌منظور ثابت نگه داشتن دما به این سیستم اضافه شد. در ابتدای هر آزمایش به نمونه آب اکسیژنه اضافه کرده و پس از ۱۰ دقیقه اختلاط، لامپ UV اضافه می‌شد. لامپ UV دارای شدت ۱۲۵ میلی وات بر سانتی‌متر مربع، ساخت شرکت NARVA آلمان مدل NEF با طول موج ۲۵٤ nm بود. مطالعه در دو مرحله بهینه‌سازی و انجام آزمایش‌های اصلی صورت پذیرفت. قبل از شروع مراحل کار یک تست کنترلی تحت شرایط یکسان به‌مدت ۲ ساعت بدون افزودن مواد شیمیایی و تابش اشعه UV انجام گرفت. در مرحله بهینه‌سازی ابتدا pH بهینه فرآیند و سپس غلظت بهینه H_2O_2 مصرفی تعیین گردید. اندازه‌گیری غلظت فرمالدئید باقیمانده با روش رنگ سنجی و استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر APEL با شماره مدل ۳۰۳ PD-UV در طول موج ٤۱۲ nm و با کاربرد معرف هانژ انجام گرفت [۲٤]. با استفاده از pH متر مدل pH262 ساخت شرکت فناوری تجهیزات، pH محلول آبی اندازه‌گیری شده و با کاربرد محلول‌های نرمال NaOH و HCl تنظیم گردید. نتایج به‌دست آمده با روش آنالیز اندازه‌گیری‌های تکراری آمیخته و با استفاده از نرم افزار SPSS ویرایش ۱۱/۵ مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند.

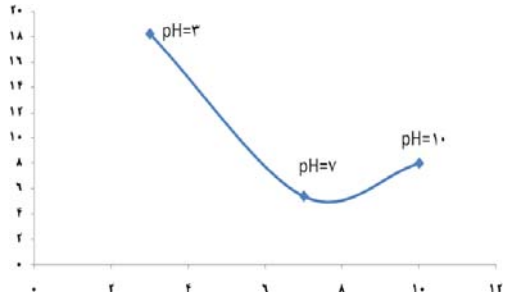
[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-11-23]



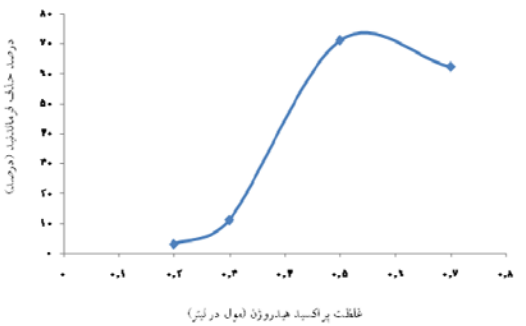
شکل شماره ۱- شماتیک فرایند اکسیداسیون پیشرفته

نتایج

مرحله بهینه‌سازی به‌منظور تعیین محدوده مطلوب pH و غلظت H_2O_2 جهت انجام آزمایش اصلی صورت گرفت. شدت تابش UV در تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر ۱۲۵ میلی وات بر سانتی‌متر مربع بود. ابتدا pH های ۳ و ۷ و ۱۰ در سه بازه اصلی اسیدی، خنثی و قلیایی در زمان پرتوتابی ۶۰ دقیقه بررسی شدند [۳]. نتایج با استفاده از آنالیز واریانس دو طرفه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. طبق شکل شماره ۲ در pH=۳ درصد حذف فرمالدئید در محدوده اسیدی دارای راندمان بالاتری است ($P<0/001$)؛ لذا به‌منظور دقت بیشتر در یافتن pH بهینه فرآیند آزمایش‌های اصلی در مقادیر pH برابر ۲، ۳ و ٤ انجام شد. در ادامه غلظت‌های ۰/۰٤، ۰/۰۸، ۰/۱۲ و ۰/۱٦ مول در لیتر H_2O_2 [۲۰] در زمان ۶۰ دقیقه و pH ۳ به محلول اضافه شدند و تغییر چندانی در حذف فرمالدئید نسبت به مرحله قبل مشاهده نگردید. سپس، غلظت‌هایی بالاتر از مقادیر قبل شامل mol/L ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ H_2O_2 مورد بررسی قرار گرفت (شکل شماره ۳). پس از انجام آنالیز واریانس دو طرفه، غلظت mol/L ۰/۵ H_2O_2 به‌عنوان غلظت بهینه انتخاب شد ($P<0/001$). در اینجا نیز آزمایش‌های اصلی در غلظت‌های ۰/٤، ۰/۵، ۰/٦ و ۰/۷ مول در لیتر H_2O_2 و در نمونه شاهد انجام شد تا غلظت مطلوب پراکسید هیدروژن مصرفی در فرآیند UV/H_2O_2 با دقت بیشتری تعیین گردد. در نهایت آزمایش‌های اصلی در شرایط مزبور و در چهار زمان پرتوتابی ۰، ۲۰، ٤۰ و ۶۰ دقیقه انجام گرفت [۳].



شکل شماره ۲- درصد حذف فرمالدئید در زمان پرتوتابی ۶۰ دقیقه و غلظت ۰/۰۸ مول در لیتر H_2O_2

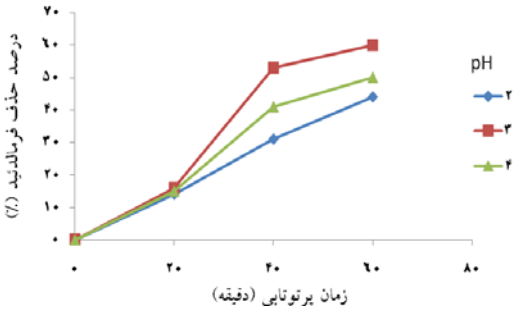


شکل شماره ۳- درصد حذف فرمالدئید در زمان پرتوتابی ۶۰ دقیقه و pH=۳

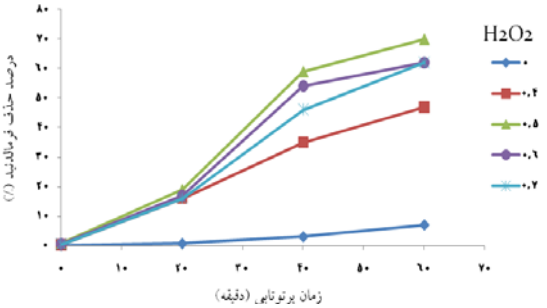
نتایج حذف فرمالدئید به‌عنوان تابعی از pH محلول آبی و غلظت H_2O_2 در شکل شماره ٤ و ۵ آمده است. در شکل شماره ٤ اثر H_2O_2 و در شکل شماره ۵ اثر pH خنثی شده است. یعنی با وجود pH و H_2O_2، تغییرات هر کدام بر حسب زمان پرتوتابی ترسیم شده‌اند (univariate). با توجه به اطلاعات ارائه شده در شکل شماره ٤ میزان حذف فرمالدئید در pH=۲ و در زمان‌های ۲۰، ٤۰ و ۶۰ دقیقه به‌ترتیب برابر ۱٤، ۳۱ و ٤٤ درصد بوده در حالی‌که میزان حذف در pH=٤ در زمان‌های مزبور به‌ترتیب معادل ۱۵، ٤۱ و ۵۰ درصد بوده است. طبق شکل شماره ٤ بیشترین میزان حذف فرمالدئید در pH=۳ رخ داده است؛ به‌طوری‌که در این pH و در زمان‌های ۲۰، ٤۰ و ۶۰ دقیقه به‌ترتیب ۱٦، ۵۳ و ۶۰ درصد از فرمالدئید حذف شده است. اطلاعات ارائه شده در شکل شماره ۵ نشان می‌دهد میزان حذف فرمالدئید با افزودن آب اکسیژنه تا غلظت ۰/۵ مول در لیتر افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود درصد حذف فرمالدئید در غیاب آب اکسیژنه و در زمان‌های ۲۰، ٤۰ و ۶۰ دقیقه به‌ترتیب برابر ۰/۷، ۳ و ۷ درصد بوده است. در زمان ثابت ٤۰ دقیقه در غلظت‌های ۰/٤، ۰/۵، ۰/٦ و ۰/۷ مول بر لیتر H_2O_2 میزان حذف فرمالدئید به‌ترتیب برابر ۳۵، ۵۹، ۵٤ و ٤٦ درصد شد. طبق شکل شماره ۵ در pH=۳ و زمان ۶۰ دقیقه بیشترین میزان حذف فرمالدئید صورت گرفته است؛ به‌طوری‌که در غلظت‌های mol/L ۰/٤، ۰/۵، ۰/٦ و ۰/۷ پراکسید هیدروژن میزان حذف فرمالدئید به‌ترتیب به ٤۷، ۷۰، ٦۱ و ٦۲ درصد رسید. مطابق با شکل شماره ۵ کمترین میزان حذف در زمان ۲۰ دقیقه واقع شده است. در این زمان و در غلظت‌های mol/L ۰/٤، ۰/۵، ۰/٦ و ۰/۷ از H_2O_2، میزان حذف فرمالدئید به‌ترتیب به‌میزان ۱٦، ۱۹، ۱۷ و ۱٦ درصد حاصل شده است. با آنالیز نتایج توسط روش اندازه‌گیری‌های تکراری آمیخته

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-11-23]

مشخص شد میزان حذف فرمالدئید با زمان پرتوتابی، pH فرآیند و غلظت H_2O_2 مصرفی ارتباط معنی‌داری دارد ($P<0/001$).



شکل شماره ٤- درصد حذف فرمالدئید برحسب زمان پرتوتابی و pH محلول آبی



شکل شماره ٥- درصد حذف فرمالدئید برحسب زمان و H_2O_2 مصرفی

بحث

با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش ملاحظه می‌شود با روش UV/H_2O_2 بیشترین میزان حذف فرمالدئید در pH=۳، زمان ٦٠ دقیقه و با مصرف غلظت ۰/٥ mol/L آب اکسیژنه صورت گرفته است. در سیستم UV/H_2O_2 نحوه واکنش رادیکال هیدروکسیل با فرمالدئید به‌خوبی شناخته شده است. همان‌طور که در روابط زیر نشان داده شده است فرمالدئید می‌تواند در حضور اکسیژن به فرمیت و رادیکال هیدروپیروکسیل تبدیل شود. فرمیت تولید شده از فرمالدئید نیز می‌تواند به رادیکال هیدروپیروکسیل تبدیل گردد [۲٥]:

$$CH_2O + {}^{\bullet}OH \rightarrow HCOO^- + HO_2^{\bullet} + H^+$$
$$HCOO^- + {}^{\bullet}OH + O_2 + H^+ \rightarrow HO_2^{\bullet} + H_2O + CO_2$$

طبق یافته‌های پژوهش حاضر عواملی چون مقدار H_2O_2 مصرفی، زمان تابش نور UV و pH بر عملکرد فرآیند اکسیداسیون پیشرفته و حذف فرمالدئید مؤثر می‌باشد. بررسی میزان مصرف H_2O_2 بر حذف فرمالدئید نشان داد که در مدت زمان ٦٠ دقیقه با مصرف مقادیر ۰/٤ و ۰/٥ مول بر لیتر H_2O_2، درصد حذف فرمالدئید به‌ترتیب معادل ٤٧ و ٧٠ درصد می‌شود. زمانی‌که غلظت H_2O_2 به ۰/٦ و ۰/۷ افزایش می‌یابد، حذف فرمالدئید به‌میزان ٦١ و ٦٢ درصد کاهش می‌یابد؛ زیرا در مقادیر بالاتر پراکسید هیدروژن رادیکال‌هایی با قدرت اکسید کنندگی کمتر از رادیکال هیدروکسیل تشکیل می شوند [۲۷،۲٦]. غلظت پایین H_2O_2 مقدار ناکافی رادیکال $^{\bullet}OH$ در محلول آبی تولید کرده و سرعت پایین‌تر اکسیداسیون را سبب می‌شود [۲۸]. افزایش بیشتر در غلظت H_2O_2 سبب کاهش میزان حذف فرمالدئید می‌شود که نشان‌دهنده اثر بازدارنده آن بر کارآیی فرآیند است. Evgenidou و همکاران بیان کردند این اثر بازدارندگی H_2O_2 می‌تواند به‌دلیل عمل کردن H_2O_2 به‌عنوان رباینده رادیکال [۲۷]، یا به‌دلیل تولید رادیکال‌های با اکتیویته کمتر از هیدروکسیل –مانند هیدروپروکسیل – در زمانی که بیش از نیاز افزوده می‌شود، باشد [۲۹]. بر طبق معادله‌های زیر مقادیر بالاتر H_2O_2 تا حدی در واکنش موجب تولید بیشتر $^{\bullet}OH$ شده و باعث مقادیر بالاتری از حذف فرمالدئید می‌گردد:

$$1\text{- } H_2O_2 + hv \rightarrow 2\ HO^{\bullet}$$
$$2\text{- } H_2O_2 + HO^{\bullet} \rightarrow HO^{\bullet}_2 + H_2O$$
$$3\text{-} H_2O_2 + HO^{\bullet}_2 \rightarrow HO^{\bullet} + H_2O + O_2$$
$$4\text{- } 2\ HO^{\bullet} \rightarrow H_2O_2$$
$$5\text{- } 2\ HO^{\bullet}_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$$
$$6\text{- } HO^{\bullet} + HO^{\bullet}_2 \rightarrow H_2O + O_2$$

باید در نظر داشت که درصد حذف فرمالدئید در حضور مواد رباینده رادیکال مانند بیکربنات‌ها نیز به‌شدت کاهش می‌یابد. این مسئله حاکی از این است که عامل حذف در این قبیل فرآیندها مصرف رادیکال هیدروکسیل توسط آلاینده مورد نظر بوده و در صورت مصرف آن توسط مواد رباینده رادیکال میزان حذف کاهش می‌یابد [۲۸]. نتایج مطالعه حاضر حاکی از آن است که مدت زمان پرتوتابی بر درصد حذف فرمالدئید مؤثر است. در pH ٤ و زمان‌های ۲۰، ٤۰ و ٦۰ دقیقه میزان حذف به‌ترتیب به ۱٥، ٤۱ و ٥۰ درصد رسید. علت این امر این است که در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته با تولید رادیکال فعال هیدروکسیل آلاینده‌های آلی حذف می‌شوند و گذشت زمان سبب افزایش تولید رادیکال $^{\bullet}OH$ می‌گردد [۳۰]. از آنجایی‌که در واکنش‌های فتوشیمیایی pH نمونه دارای اهمیت زیادی است [۳۱]، در این پژوهش به بررسی اثر pH در حذف فرمالدئید نیز پرداخته شد. همان‌طور که در شکل شماره ٤ مشاهده می‌شود درصد حذف فرمالدئید در pHهای ٤ و ۲ کمتر از pH=۳ بوده است. در مطالعه Mandavgane و Yenkie که به بررسی حذف اسید سالیسیلیک توسط فرآیندهای مختلف از جمله UV/H_2O_2 پرداخته شده است، محدوده pH خنثی به‌عنوان pH مطلوب در روش UV/H_2O_2 معرفی شده است که نتیجه مطالعه مزبور با پژوهش حاضر هم‌خوانی ندارد [۳۲]. اما بر اساس نتایج برخی مطالعات

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-11-23]

pH بهینه قابل قبول در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته فنتون، فتوفنتون و UV/H_2O_2 در ۳±۰/۱ می‌باشد [۲۲]. Salari و همکاران بیان کردند محیط قلیایی در روش UV/H_2O_2 با کاهش سرعت تجزیه ترکیبات حد واسط سبب کاهش سرعت تجزیه آلاینده‌ها می‌شود [۳۳]. البته محیط با pHهای بسیار پایین نیز مطلوب نیست. طبق مطالعات انجام شده در صورت استفاده از پراکسید هیدروژن به‌عنوان عامل اکسیداسیون راندمان حذف ترکیبات آلدئیدی در pH های بسیار اسیدی پایین می‌باشد [۳٤]. به‌همین جهت در مطالعه حاضر درصد حذف فرمالدئید در pH=۲ از این میزان در pH های ۳ و ٤ کمتر است.

نتیجه‌گیری

بررسی عملکرد فرآیند اکسیداسیون پیشرفته UV/H_2O_2 در حذف فرمالدئید از محلول حاوی غلظت بالای فرمالدئید نشان داد که این روش بستگی زیادی به زمان واکنش، pH نمونه و غلظت پراکسید هیدروژن دارد. از بین زمان‌های مورد بررسی، مدت زمان واکنش ٦۰ دقیقه به‌عنوان زمان بهینه انجام فرآیند می‌باشد. سایر شرایط بهینه بهره‌برداری شامل pH بهینه ۳ و غلظت H_2O_2 ۰/۵ mol/L میزان ۷۰ درصد حذف فرمالدئید به‌دست آمد. از آنجایی‌که مشکل اصلی کاربرد فرآیندهای بیولوژیکی برای فاضلاب صنعتی حاوی فرمالدئید با غلظت بیش از ظرفیت راکتورهای بیولوژیکی (g/L ۲-۱/۵) است، لذا می‌توان با کاربرد فرایند اکسیداسیون پیشرفته UV/H_2O_2 به غلظت قابل تجزیه بیولوژیکی فرمالدئید دست یافت.

تشکر و قدردانی

مراتب تقدیر و تشکر خود را از معاون محترم پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی کاشان جناب آقای دکتر حمیدی و کارشناس محترم آزمایشگاه بهداشت محیط سرکار خانم صداقت اعلام می‌داریم. پژوهش حاضر بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد و با شماره طرح (۹۱۱٦) می‌باشد.

References:

[1] Salman M, Athar M, Shafique U, Rehman R, Ameer S, Ali SZ, et al. Removal of formaldehyde from aqueous solution by adsorption on kaolin and bentonite: a comparative study. ***Turkish J Eng Environ Sci*** 2011; 36: 263-70.

[2] Lotfy HR, Rashed I G. Amethod for treating wastewater containing formaldehyde. ***Water Res*** 2002; 36(3): 633–7.

[3] Kowalik P. Chemical pretreatment of formaldehyde wastewater by selected Advanced Oxidation Processes (AOPs). ***Nat Sci*** 2011; 2(4): 42-8.

[4] Oliveira SV, Moraes EM, Adorno MA, Varesche MB, Foresti E, Zaiat M. Formaldehyde degradation in an anaerobic packed-bed bioreactor. ***Water Res*** 2004; 38(7): 1685-94.

[5] Vidal G, Jiang ZP, Omil F, Thalasso F, Méndez R, Lema JM. Continuous anaerobic treatment of wastewaters containing formaldehyde and urea. ***Bioresource Technol*** 1999; 70: 283-91.

[6] Campos JL, S´anchez M, Mosquera-Corral A, M´endez R, Lema JM. Coupled BAS and Anoxic USB System to Remove Urea and Formaldehyde From Wastewater. ***Water Res*** 2003; 37(14): 3445-51.

[7] Jarusutthirak C, Sangsawang K, Mattaraj S, Jiraratananon R. Treatment of Formaldehyde-Containing Wastewater Using Membrane Bioreactor. ***J Environ Eng*** 2012; 138: 265-71.

[8] Garrido JM, Mendez R, Lema JM. Treatment of wastewaters from a formaldehyde–urea adhesives. ***Water Sci Technol*** 2000; 42: 293-301.

[9] Zoutberg GR, Been P de. The Biobed EGSB (expanded granular sludge bed) system covers shortcomings of the upflow anaerobic sludge blanket reactor in the chemical industry. ***Water Sci Technol*** 1997; 35(10): 183-8.

[10] Leon C, Ponce De, Pletcher D. Removal of formaldehyde from aqueous solutions via oxygen reduction using a reticulated vitreous carbon cathod cell. ***J Applied Electrochemistry*** 1995; 25: 307-14.

[11] Casteel SW, Vernon RJ, Bailey EM Jr. Formaldehyde: toxicology and hazards. ***Vet Hum Toxicol*** 1987; 29(1): 31-3.

[12] Lu Z, Hegemann W. Anaerobic toxicity and biodegradation of formaldehyde in batch cultures. ***Water Res*** 1998; 32: 209-15.

[13] Grafstrom RC, Curren RD, Yang LL, Harris CC. Genotoxicity of formaldehyde in cultured human bronchial fibroblasts. ***Science*** 1985; 228(4695): 89-91.

[14] Moussavi G, Bagheri A, Khavanin A. The investigation of formaldehyde removal from aqueous solutions use of electrofenton process by alominium and iron electrod. ***J Kordestan Univ Med Sci*** 2012(17): 72-81. [in Persian].

[15] Bolton JR, editors. Ultraviolet Applications Handbook. Ontario; 1999.

[16] Moussavi G, Bagheri A, Khavanin A. The investigation of degradation and mineralization of high concentrations of formaldehyde in an electro-Fenton process combined with the biodegradation. ***J Hazard Mater*** 2012(237): 147-52.

[17] Huston PL, Pignatello JJ. Degradation of selected pesticide active ingredients and

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-11-23]

commercial formulations in water by the photo-assisted Fenton reaction. ***Water Res*** 1999; 33(5): 1238-46.
[18] Fukunaga MT, Guimaraes JR, Bertazzoli R. Kinetics of the oxidation of formaldehyde in a flow electrochemical reactor with TiO2/RuO2 anode. ***Chem Eng J*** 2008; 136: 236–41.
[19] Silva AMT, Castelo-Branco IM, Quinta-Ferreira RM, Levec J. Catalytic studies in wet oxidation of e%uents from formaldehyde industry. ***Chem Eng Sci*** 2003; 58: 963-70.
[20] Moussavi G, Yazdanbakhsh A, Heidarizad M. The removal of formaldehyde from concentrated synthetic wastewater using O3/MgO/H2O2 process integrated with the biological treatment. ***J Hazard Mater*** 2009; 171(1-3): 907–13.
[21] Neyens E, Baeyens J. A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. ***J Hazard Mater*** 2003; 98(1-3): 33-50.
[22] Dincer AR, Karakaya N, Gunes E, Gunes Y. Removal of COD from oil recovery industry wastewater by the Advanced Oxidation Process(AOP) based on H_2O_2. ***Global NEST J*** 2008; 10(1): 31-8.
[23] Mostafaii GhR, Dehghani R, Hasanzadeh M, Mousavi GA. A comparison between advanced O3/UV and H2O2/UV oxidation processes for the treatment of municipal solid waste leachateA comparison between advanced O3/UV and H2O2/UV oxidation processes for the treatment of municipal solid waste leachate. ***Feyz*** 2012; 16(1): 71-8. [in Persian]
[24] Nash T. The colorimetric estimation of formaldehyde by means of the Hantzch reaction. ***Biochem J*** 1953; 55(3): 416–21.
[25] Lee Y, Lee C, Yoon J. Kinetics and mechanisms of DMSO (dimethylsulfoxide) degradation byUV/H 2O2 process. ***Water Res*** 2004; 38(10): 2579-88.
[26] Suh JH, Mohseni M. A study on the relationship between biodegradability enhancement and oxidation of 1,4-Dioxane using ozon and hydrogen peroxide. ***Water Res*** 2004; 38(10): 2596-604.
[27] Evgenidou E, Fytianos K, Poulios I. Photocatalytic oxidation of dimethoat in aqueous solutions. ***J Photochemistry Photobiol*** 2005; 175: 29-38.
[28] Benitez FJ, Beltran-Heredia J, Acero JL, Rubio F J. Oxidation of several chlorophenolic derivatives by UV irradiation and hydroxyl radicals. ***J Chem Technol Biochtechnol*** 2001; 76(3): 312-20.
[29] Coleman HM, Vimonses V, Leslie G, Amal R. Removal of Contaminants of concern in water using advanced oxidation techniques. ***Water Sci Technol*** 2007; 55(12): 301-6.
[30] Mohajerani M, Mehrvar M, Ein-mozaffari F. An overview of the integration of advanced oxidation technologies and other processes for water and wastewater treatment. ***Int J Engin*** 2009; 3(2): 120-46.
[31] Giri RR, Ozaki H, Takayanagi Y, Taniguchi S, Takanami R. Efficacy of ultraviolet radiation and hydrogen peroxide oxidation to eliminate large number of pharmaceutical compounds in mixed solution. ***Int J Environ Sci Tech*** 2011; 8(1): 19-30.
[32] Mandavgane SA, Yenkie MKN. Degradation of salicylic acid by UV, UV/ H2O2, UV/O3, photofenton processes. ***J Chem*** 2011; 4(3): 640-7.
[33] Salari D, Daneshvar N, Aghazadeh F, Khataee AR. The invrstigation of MTBE removal from water resources by UV/H2O2. ***9th National Congress of Iran Chemistry Engineering,*** 2004, Tehran, Iran.
[34] Alverez-Gallegos A, Pletcher D. The removal of low level organics via hydrogen peroxide formed in a reticulated vitreous carbon cathode cell. Part 2: The removal of phenols and related compounds from aqueous effluents. ***Electrochimica Acta*** 1999(44): 2483-92.

[Downloaded from feyz.kaums.ac.ir on 2026-11-23]