



Journal of Environmental Studies

Vol. 46, No. 1, Spring 2020

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Optimization of the Electrolysis Process Efficiency to Improve the Anaerobic Baffled Reactor Performance by Controlling the pH Value for Wastewater Treatment

Document Type
Research Paper

Gagik Badalians Gholikandi*, Behnam Inanloo Beklar, Maryam Amouamouha

Received
August 17, 2019

Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Accepted
January 24, 2020

DOI: [10.22059/JES.2021.240316.1007491](https://doi.org/10.22059/JES.2021.240316.1007491)

Abstract

After previous studies, in this research, in order to improve the performance of conventional anaerobic baffled reactor reactors (ABR), the use of electrolysis process under optimum conditions by controlling the pH value and minimum electricity consumption on a laboratory scale has been investigated. Various parameters impact electrolysis process, including electrode material (iron, stainless steel, copper, aluminum and brass), initial pH value, electric current density, electrolysis process duration, and distance between electrodes. Considering all aspects, the iron electrode is the most suitable material. Increasing the distance and the contact surface of electrodes can decrease and increase the electrical current, respectively. By applying the electrical current density of 8 mA/cm² to the iron electrodes, after passing 1.5 hours, the pH value reaches to 9.5. Also, the range of 8-11 mA/cm² was selected as the best range for the current density. It can be concluded that the electrolysis process under optimum operation conditions is an appropriate option for upgrading the anaerobic baffled reactors performance.

Keywords: Anaerobic baffled reactor, Electricity consumption, Electrolysis process, pH adjustment, Wastewater treatment.

* Corresponding author

Email: g.badalians@yahoo.cm; G_Badalians@sbu.ac.ir

Introduction

In this research, in order to improve the performance of conventional ABR reactors, the use of electrolysis process under optimum conditions by controlling the pH value and minimum electricity consumption on a laboratory scale has been investigated.

In anaerobic reactors, the pH value is strongly influenced by the quantity of carbon dioxide contained in the biogas. Significant variation of pH value and alkalinity occurs because of substrate influence, and acidic- alkaline compounds production during organic matters decomposition process. In this reactor, methanogenesis bacteria is very sensitive to changes in pH value and alkalinity. Therefore, maintenance of optimum operation conditions is mandatory. The suitable pH value for the anaerobic reactors performance is in the range of 6.8-7.2.

The alkalinity is initially in the form of bicarbonate. According to Reaction (1), it is in equilibrium with existing carbon dioxide in biogas, at a certain pH value.



For pH controlling in an electrochemical system using metal electrodes, electrolysis of water takes place by means of an electrical current to maintain load balancing. Water electrolysis occurrence results in oxygen and proton formation in the anode sector, also hydrogen and hydroxide in the cathode sector. Consequently, the pH value increases close to the cathode, while reducing pH value is observable in the anode sector. By the reducing pH value around the anode, Reaction (1) proceeds towards the production of carbon dioxide and hydroxide. After the power outage due to the low carbon dioxide solubility in accordance to Henry's law, this reaction becomes irreversible. As a result, the main reason for pH increasing due to the electrolysis is the displacement of the bicarbonate balance and the release of carbon dioxide gas around the anode. Various parameters impact electrolysis process, including electrode material, initial pH value, electric current density, electrolysis process duration, and distance between electrodes. In this study, in order to optimize the electrolysis process for pH recovery, these factors were investigated on a setup in laboratory scale.

Materials and Methods

In order to improve the anaerobic baffled reactor performance, laboratory studies to investigate the electrolysis process effect on the pH value controlling were conducted. Thus, several samples were taken from different chambers of the reactor and the effective parameters on electrolysis process were investigated by focusing on the pH value. Samples were affected by electrolysis using two identical electrodes of iron, stainless steel, copper, aluminum and brass with 12 cm length, 6 cm width and 1 mm thickness at different distances and different contact surfaces.

At each stage of the laboratory studies, in order to get closer to the real conditions during an organic shock, the initial pH value of the wastewater sample was adjusted to the range of 5.00 to 6.50 by using sulfuric acid. Also, with conducting electricity, the capability of each electrode material were investigated. After a period of time required for pH recovery, the electric current was cut off and the pH value, concentration of released metals, electrolysis time and electrical current density were measured. All experiments were performed according to the standard methods.

In the experiments, synthetic wastewater (COD = 700±40 and TDS = 633±4 mg/L) was investigated. The wastewater was prepared using molasses, ammonium chloride (0.007 g/g COD) and potassium di hydrogen orthophosphate anhydrous (0.0006 g/g COD). The temperature and pH value of the wastewater were 45±1 °C and 7.77±0.04, respectively.

Discussion of Results

Investigating the effect of electrodes material

At this stage, five types of iron, stainless steel, copper, aluminum and brass electrodes were tested under the same conditions, and the electrolysis time needed to revive a pH value was obtained. The results showed that the iron electrode can revive a pH unit of the sample in a shorter period of time and also a less electrical energy consumption. Furthermore, according to the results of the spectroscopic test and the inhibitory concentration for each material, it can be seen that copper and brass electrodes cause a release of copper metal more than the permitted limits. Therefore, they are unsuitable for use in this regard.

The results of the economic survey showed that the cost of iron electrode preparation is much lower than the others. Considering all aspects, the iron electrode is the most suitable material for using in the ABR reactor.

Investigating the effect of distance and contact surface of electrodes with wastewater

Under the same conditions, increasing the distance and the contact surface of electrodes can decrease and increase the electrical current, respectively. The reason is the direct relation between the electrical resistance of the solution with the distance of electrodes, its inverse relation with the contact surface of electrodes, and Ohm's law on electrolytes. These effects can neutralize each other, which is important in an economic point of view.

Investigating the effect of electrolysis time

By increasing the electrolysis time, the pH value also increases. While the rate of rising pH is decreasing, as time elapses, the increase of hydroxide and alkalinity occur according to Reaction (1). As a result, due to the buffering properties, the resistance to pH changes increases and this reaction stops. By applying the electrical current density of 8 mA/cm² to the iron electrodes, after passing 1.5 hours, the pH value reaches to 9.5. This suggests that by increasing the time, the efficiency of the system and the electric energy consumption will increase.

Investigating the effect of electrical current density

The rate of metal dissolution in wastewater is a function of the electric current density. The increase in the current density causes an increase in the exchange of electrons, which in turn accelerates the electrolysis process. As a result, the efficiency of the electrolysis process increases for the pH recovery. In this study, based on the amount of pH recovery and electrical energy consumption in 1.5 hours, the range (8-11 mA/cm²) was selected as the best range for the current density in laboratory scale.

Investigating the effect of TDS

Concentration of total dissolved solids (TDS) is one of the parameters affecting the current density. Whenever the concentration of these substances is high, the number of charged particles, which are actually electron carriers, will increase. Therefore, the electron transfer is facilitated and accelerated.

Investigating the effect of initial pH value

In order to establish acidic conditions for investigating ability of the electrolysis process with the aim of returning the pH value to neutral and alkaline conditions, initial pH value was determined in several steps in the range of 5.00, 5.50, 6.00 and 6.50. By performing the electrolysis process under optimum conditions, it was found that the lower range of the initial pH value will result in the easier pH recovery.

The reason is an increasing in the dissolution of iron atoms by reducing the initial pH value.

Conclusions

Based on the results of previous researches regarding efficiency of electrolysis process to improve the performance of anaerobic reactors, in this study, optimization of the process was investigated on laboratory scale. Based on the obtained results, it can be concluded that the electrolysis process under optimum operation conditions in terms of operational and economic parameters is an appropriate option for upgrading the anaerobic baffled reactors performance.

بهینه‌سازی کارآمدی فرایند الکترولیز به منظور ارتقای عملکردی راکتور بافل‌دار بی‌هوازی تصفیه فاضلاب از طریق کنترل مقدار pH

گاگیک بدلیانس قلی‌کندی*، بهنام اینانلو بکلر، مریم عموموها

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۴

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۸/۵/۲۶

چکیده

در پی نتایج اولیه حاصل از امکان‌سنجی به‌کارگیری فرایند الکترولیز به منظور افزایش کارآمدی راکتور بافل‌دار بی‌هوازی تصفیه فاضلاب، در این تحقیق، فرایند الکترولیز با هدف بهینه‌سازی و ارتقای عملکردی این راکتور، در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شد. در این راستا، عوامل مؤثر شامل جنس الکترودها (آهن، فولاد ضدزنگ، مس، آلومینیوم و برنج)، فاصله و سطح تماس الکترودها، مدت‌زمان الکترولیز، چگالی جریان الکتریکی، غلظت جامدات محلول و مقدار pH اولیه فاضلاب بررسی شدند. بر اساس نتایج حاصل، بهترین جنس الکترودها از نظر مدت‌زمان و انرژی الکتریکی لازم برای احیای یک واحد pH، آهن است. همچنین مشخص شد که افزایش حجم کنترل فاضلاب تحت تأثیر فرایند الکترولیز، موجب افزایش کارآمدی سامانه می‌شود که این امر بیانگر نیاز به افزایش سطح تماس و فاصله الکترودها به منظور ارتقای عملکردی سامانه است. یافته‌ها نشان دادند که میزان احیای pH فاضلاب در مدت‌زمان ۱/۵ ساعت، حدود ۳/۵ واحد است که پاسخ‌گوی افت pH در راکتور هنگام وقوع شوک‌های ناشی از بار آلی است. همچنین محدوده بهینه برای چگالی جریان از نظر میزان احیای pH فاضلاب، $8-11 \text{ mA/cm}^2$ به دست آمد؛ بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به‌کارگیری فرایند الکترولیز به منظور تنظیم مقدار pH تحت شرایط بهینه راهبری این سامانه موجب ارتقای کارآمدی راکتور و کاهش مصرف انرژی الکتریکی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تصفیه زیستی بی‌هوازی فاضلاب، فرایند برقکافت، قلیائیت، مصرف انرژی الکتریکی.

۱. سرآغاز

راکتور بافل‌دار بی‌هوازی^۱ (ABR) تحت بسیاری از شرایط نسبت به سایر راکتورهای بی‌هوازی با سرعت بالا برتری دارد (Barber & Stuckey, 1999; Liu et al., 2010; Badalians Gholikandi et al., 2014; Putra et al., 2020; Al Smadi et al., 2019; Moges et al., 2018; Bojpa, 2017). این راکتور دارای مزایای متعددی از جمله پتانسیل حفظ زیست‌توده در راکتور با استفاده از عملکرد هیدرولیکی،

راکتورهای بی‌هوازی تصفیه فاضلاب اغلب به‌عنوان واحدهای پیش‌تصفیه فرایندهای هوازی و در مواردی راهکار اصلی تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی استفاده می‌شوند. این راکتورها در مقایسه با راکتورهای هوازی دارای مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی هستند و بدین دلیل همواره مورد توجه طراحان و محققان قرار دارند.

Email: g.badalians@yahoo.cm; G_Badalians@sbu.ac.ir

* نویسنده مسئول:

DOI: [10.22059/JES.2021.240316.1007491](https://doi.org/10.22059/JES.2021.240316.1007491)

DOR: [20.1001.1.10258620.1399.46.1.8.7](https://doi.org/20.1001.1.10258620.1399.46.1.8.7)

توانایی جداسازی دو فاز اسیدسازی و متان‌سازی در طول راکتور و قابلیت متعادل‌سازی و تسهیل تکامل زیستی اجتماع میکروبی است (Badalians Gholikandi et al., 2014). در این تحقیق، با توجه به اهمیت تأثیرگذاری پارامتر pH بر روند انجام فرایند چندمرحله‌ای زیستی بی‌هوازی و کارآمدی آن، بررسی به‌کارگیری و بهینه‌سازی فرایند الکترولیز به‌منظور کنترل مقدار pH با صرف حداقل انرژی الکتریکی در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد.

در راکتورهای بی‌هوازی، مقدار pH فاضلاب به‌شدت تحت تأثیر میزان کربن دی‌اکسید موجود در محیط است. هنگام تجزیه ترکیبات آلی، اسیدهای آمینه و پروتئین‌ها، کربن دی‌اکسید و آمونیاک آزاد می‌شوند. کربن دی‌اکسید سبب تولید اسیدکربنیک و قلیائیت کربناته و بی‌کربناته و آمونیاک به تولید یون آمونیوم منجر می‌شود. تغییرات زیاد قلیائیت و pH تحت تأثیر ورود مواد غذایی^۱ و تولید ترکیبات اسیدی و قلیایی مانند اسیدهای آمینه و یون آمونیوم طی تجزیه ترکیبات آلی رخ می‌دهد. در فرایند تجزیه اسیدهای آمینه و پروتئین‌ها، گروه آمین (-NH_2) رها شده و آمونیاک تشکیل می‌شود. آمونیاک نیز در آب حل شده و در ترکیب با کربن دی‌اکسید به شکل آمونیوم بی‌کربنات درمی‌آید و تولید قلیائیت می‌کند. اسیدهای آلی تولیدشده در اثر تجزیه مواد آلی موجب از بین رفتن قلیائیت تولیدشده می‌شوند (Gerardi, 2003). در این راکتورها، با توجه به بازدهی پایین انرژی حاصل از مصرف اسیدهای چرب فرار^۲ توسط باکتری‌های متان‌ساز، سرعت رشد آن‌ها محدود است. باکتری‌های متان‌ساز بی‌هوازی مطلق هستند و نسبت به تغییرات میزان قلیائیت و pH بسیار حساس هستند؛ بنابراین حفظ شرایط راهبری بهینه برای اطمینان از وجود سرعت‌های مناسب تجزیه جامدات، تولید متان، میزان رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌ها و پاسخ راکتور به تغییرات ورودی الزامی است (بدلیانس قلی‌کندی، ۱۳۹۵؛ Bitton, 2005; Gerardi, 2006; Tchobanoglous et al., 2014).

برای کنترل pH باید مقدار قلیائیت فاضلاب کافی باشد.

قلیائیت به‌عنوان بافر عمل می‌نماید تا مانع تغییرات سریع مقدار pH شود. کاهش قلیائیت و در نتیجه تغییرات pH در صورت تجمع اسیدهای آلی به دلیل عدم تبدیل بیولوژیکی آن‌ها به متان یا وجود عوامل بازدارنده محیطی مؤثر بر فعالیت زیستی باکتری‌های متان‌ساز رخ می‌دهد. هرچند که pH مناسب برای عملکرد راکتورهای بی‌هوازی در محدوده ۷/۲-۷/۸ قرار دارد، اما بهترین محدوده pH بین ۷/۰-۷/۲ است. مقادیر pH کم‌تر از ۶/۰ یا بیش‌تر از ۸/۰ محدودکننده رشد بوده و در برخی مواقع برای باکتری‌های متان‌ساز سمی است. حفظ قلیائیت و کنترل pH از دو طریق امکان‌پذیر است: ۱. استفاده از مواد شیمیایی (Gerardi, 2003) و ۲. استفاده از فرایند الکترولیز (بدلیانس قلی‌کندی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Aqaneghad & Moussavi, 2016).

قلیائیت در ابتدا به‌صورت بی‌کربنات موجود است و مطابق رابطه (۱) در مقدار معینی از pH با کربن دی‌اکسید موجود در بیوگاز در حالت تعادل است (بدلیانس قلی‌کندی، ۱۳۸۵).



به‌منظور بررسی در خصوص نحوه عملکرد فرایند الکترولیز برای کنترل pH در راکتور ABR باید توجه داشت که در یک سامانه الکتروشیمیایی با استفاده از الکتروود فلزی (M)، انجام رابطه‌های (۲) و (۳) در آند و رابطه‌های (۴)، (۵) و (۶) در کاتد میسر می‌شود. با برقراری جریان الکتریکی به‌منظور حفظ تعادل بار، الکترولیز آب به وقوع می‌پیوندد. الکترولیز آب در آند بر اساس رابطه (۳) گاز اکسیژن و پروتون (H^+) و در کاتد مطابق رابطه (۴) گاز هیدروژن و آنیون هیدروکسید (OH^-) تولید می‌کند. در نتیجه، pH نزدیک کاتد افزایش می‌یابد درحالی‌که pH در نزدیکی آند کاهش می‌یابد. رابطه‌های (۲) و (۶) نشان‌دهنده عملکرد الکتروشیمیایی سامانه هستند که در آن‌ها ابتدا فلز اکسید و سپس احیا می‌شود (Martinez-Huitl et al., 2018; Mahmoud et al., 2010).



گایگ بدلیانس قلی‌کندی و همکاران

موجود در فاز مایع را لخته و ته‌نشین می‌کنند. درحالی‌که حباب‌های هیدروژن تشکیل یافته با کاتد، سبب شناورسازی مواد آلی می‌شوند. فرایند الکتروشیمیایی در هر دو حالت پیوسته و ناپیوسته استفاده می‌شود؛ اما بازده تصفیه آن بستگی به شرایط اختلاط، زمان ماند، نرخ جریان و غلظت آلاینده‌ها دارد (Mouedhen et al., 2008; Sasson et al., 2009; Radjenovic & Sedlak, 2015; Sahu et al., 2017; Tahreen et al., 2020).

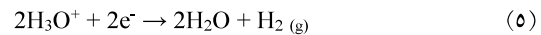
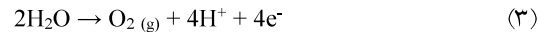
از مزایای فرایند الکترولیز می‌توان به طراحی و بهره‌برداری آسان، پتانسیل کاهش آلاینده‌ها و سادگی تجهیزات موردنیاز برای تصفیه فاضلاب اشاره کرد (Hubbe et al., 2016). این در حالی است که استفاده از مواد شیمیایی نیازمند صرف هزینه و احداث سازه انتقال و توزیع است که این امر بهره‌برداری از آن‌ها را مشکل می‌سازد.

فرایند الکترولیز تحت تأثیر عوامل گوناگونی از جمله جنس الکترودها (Koparal & Ogutveren, 2009; Mahmoud et al., 2010)، مقدار pH اولیه محلول (Kobya et al., 2006; Sevki et al., 2007; Mouedhen et al., 2008; Sarkar et al., 2010)، چگالی جریان الکتریکی (شدت جریان الکتریکی توزیع شده در واحد سطح الکترودها) (Mikko, 2012)، مدت زمان الکترولیز (Chen et al., 2003) و فاصله الکترودها (Alaadin, 2008) قرار دارد که در این تحقیق به منظور بهینه‌سازی فرایند الکترولیز برای احیای pH، این عوامل در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شدند.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. آماده‌سازی پایلوت آزمایشگاهی

عملکرد راکتور نیمه‌صنعتی بافل‌دار بی‌هوای تصفیه فاضلاب با هدف مطالعه نقاط ضعف راکتور و امکان استفاده از فرایند الکترولیز برای ارتقای عملکردی آن بررسی شد. برای این منظور نمونه‌هایی از محل جریان ورودی، اتاقک‌های مختلف راکتور و جریان خروجی آن با تمرکز بر مشخصه‌های pH، COD^o و TDS^۶ برای بررسی عملکرد راکتور تحت شرایط راهبری مختلف برداشت شد (شکل



طبق رابطه (۳)، با کاهش pH فاضلاب در اطراف آند، به‌منظور حفظ تعادل در سامانه الکتروشیمیایی، رابطه (۱) به سمت تولید کربن دی‌اکسید و آنیون هیدروکسید پیش می‌رود؛ بنابراین کف تولیدی ناشی از عمل الکترولیز فاضلاب در اطراف آند به دلیل تولید گاز کربن دی‌اکسید بر اثر جابه‌جایی تعادل در سامانه است. پس از قطع جریان برق و برگشت مجدد یون‌های هیدروژن و هیدروکسید به فاضلاب، رابطه (۱) به دلیل حلالیت پایین کربن دی‌اکسید خروجی مطابق قانون هنری، برگشت‌ناپذیر می‌شود (بدلیانس قلی‌کندی، ۱۳۸۵؛ بدلیانس قلی‌کندی و همکاران، ۱۳۹۱). در نتیجه مطابق واکنش‌های فوق، دلیل افزایش pH تحت تأثیر فرایند الکترولیز در سامانه الکتروشیمیایی، تغییر شکل یون هیدرونیوم (H_3O^+) به صورت گاز هیدروژن و تولید یون هیدروکسید در اطراف کاتد و جابه‌جایی تعادل بی‌کربنات، تولید یون هیدروکسید و خروج گاز کربن دی‌اکسید در اطراف آند است.

فرایند الکترولیز علاوه بر کنترل مقدار pH فاضلاب، موجب بهبود بازده تصفیه نیز می‌شود (بدلیانس قلی‌کندی و همکاران، ۱۳۹۹). تصفیه به کمک فرایند الکترولیز بر اساس مکانیسمی ساده انجام می‌پذیرد. در این مکانیسم که به انعقاد الکتریکی معروف است، جریان الکتریکی به یک جفت الکترودها اعمال می‌شود. با اعمال جریان الکتریکی، انحلال مواد تشکیل‌دهنده الکترودها رخ می‌دهد. به این ترتیب که الکترودها آند اکسید شده و الکترودها کاتد احیا می‌شود. به عبارت دیگر در این روش انتقال الکترون عاملی است که سبب تصفیه فاضلاب می‌شود. در طول فرایند انعقاد، کاتیون‌های ناشی از اکسیداسیون الکترودها آند با کاهش زتا پتانسیل مواد معلق و کلئیدی، موجب تشکیل لخته می‌شوند. هیدروکسیدهای فلزی تشکیل شده، آلاینده‌های

pH بررسی شد. نمونه‌های برداشت‌شده با استفاده از دو الکتروود هم‌جنس از نوع آهن، فولاد ضدزنگ، مس، آلومینیوم و برنج به طول و عرض ۱۲ و ۶ سانتی‌متر با ضخامت ۱ میلی‌متر در فواصل و سطوح تماس مختلف (حداکثر فاصله الکتروودها: ۱۱ cm، حداکثر سطح تماس الکتروودها با فاضلاب: ۶۰ cm²) تحت تأثیر الکترولیز قرار گرفتند. اختلاط در سامانه با یک همزن دستی انجام پذیرفت (شکل ۱-ا).

(۱-الف). سپس، به‌منظور ارتقای عملکردی راکتور و دستیابی به شرایط بهره‌برداری بهینه، مطالعات آزمایشگاهی به‌صورت ناپیوسته^۷ در خصوص بررسی تأثیر فرایند الکترولیز بر کنترل مقدار pH با صرف حداقل انرژی الکتریکی در یک سامانه الکتروشیمیایی انجام پذیرفت. به‌این‌ترتیب که با استفاده از بشرهای آزمایشگاهی، نمونه‌های متعددی با حجم ۵۰۰ cc از اتاقک‌های مختلف راکتور گرفته شد و عوامل مؤثر بر فرایند الکترولیز با تمرکز بر مشخصه



شکل ۱. سمت راست (الف) پایلوت راکتور بافل‌دار بی‌هوازی، سمت چپ (ب) سامانه الکتروشیمیایی پایلوت آزمایشگاهی ناپیوسته

شدت جریان الکتریکی اندازه‌گیری شدند. برای این منظور، مشخصه pH با قرائت مستقیم با پروب دستگاه اندازه‌گیری (HANNA, pH 211)، غلظت فلزات با دستگاه طیف‌سنجی^۸ (ICPS-7500, SHIMADZU) و مدت‌زمان الکترولیز با استفاده از کرنومتر تعیین شده است. الکتروودها برای تأمین پتانسیل الکتریکی موردنیاز به یک منبع تغذیه آنالوگ V ۴/۰ - ۰/۰ و ۱/۸ A - ۰/۰ (TRIO: PR-653) متصل شدند. در هر مرحله از مطالعات با استفاده از اطلاعات استخراج‌شده از نتایج آزمایش‌ها، میزان انرژی الکتریکی مصرفی در سامانه به دست آمد. تمامی آزمایش‌ها مطابق با روش استاندارد متد (APHA, 2005) انجام شدند و برای اطمینان از صحت نتایج حاصل، آزمایش‌ها با سه بار تکرار انجام پذیرفتند. استفاده از روش تضمین کیفیت داده‌ها (فرایند دیتا پروفایلینگ) شناسایی

۲-۲. نمونه‌گیری و انجام آزمایش‌ها

در هر مرحله از مطالعات آزمایشگاهی به‌صورت ناپیوسته، فاضلاب برداشت‌شده از شیرهای موجود در بدنه راکتور ABR به بشرهای آزمایشگاهی منتقل شد. برای نزدیک شدن به شرایط واقعی راکتور در حین وقوع شوک آلی، با استفاده از اسیدسولفوریک مقدار pH اولیه نمونه فاضلاب موجود در سامانه الکتروشیمیایی به محدوده ۶/۵۰ - ۵/۰۰ انتقال یافت و با برقراری جریان برق، توانایی هر جنس الکتروود در فواصل و سطوح تماس مختلف بررسی شد. پس از سپری شدن مدت‌زمان لازم برای احیای pH، جریان برق قطع شد و از عمق ۳۰ میلی‌متری از سطح آب، نمونه‌هایی برای بررسی برداشت شد. در این مرحله pH، غلظت هرکدام از فلزات آزادشده به محیط، مدت‌زمان الکترولیز و

گایک بدلیانس قلی‌کندی و همکاران

به راکتور در جدول (۱) آمده است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. بررسی تأثیر جنس الکتروود

در این مرحله پنج نوع الکتروود آهن، فولاد ضدزنگ، مس، آلومینیوم و برنج تحت شرایط یکسان از نظر مقدار pH اولیه (۶/۰۰)، ولتاژ (۱۰/۰ V)، فاصله (۷ cm)، سطح تماس با فاضلاب (۶۰ cm²) و دما (۳۵±۵ °C) آزمایش شدند و مدت زمان الکترولیز لازم برای احیای یک واحد pH برای هر کدام از آن‌ها به دست آمد. مطابق شکل (۱)، الکتروود آهن قادر است در مدت زمان کوتاه‌تر با مصرف انرژی الکتریکی کم‌تر، مقدار pH نمونه فاضلاب را به میزان یک واحد احیا کند.

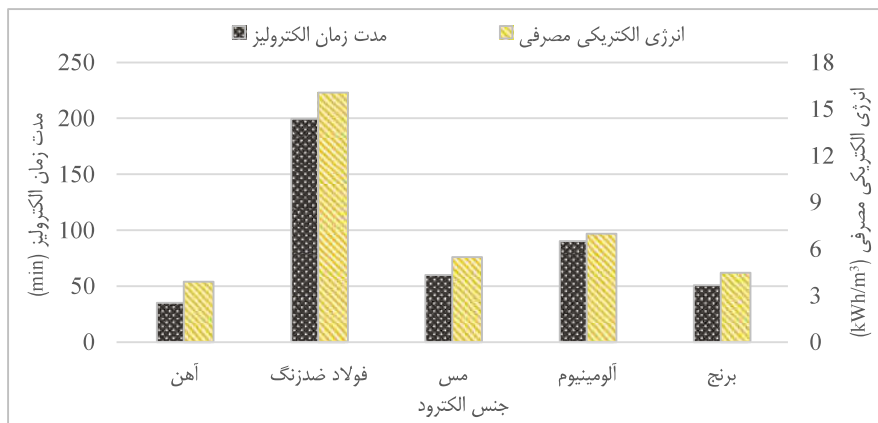
تناقض‌های ممکن و پاک‌سازی داده‌ها، همچنین روش کنترل کیفیت داده‌ها، کنترل هدفمندی و قابلیت به‌کارگیری آن‌ها را میسر می‌سازد.

۳-۲. کیفیت فاضلاب ورودی به راکتور

در مجموعه آزمایش‌های انجام‌شده، به‌منظور جلوگیری از نوسانات فاضلاب و امکان تغییر بار آلی فاضلاب ورودی به راکتور، از فاضلاب سنتتیک با COD برابر 700 ± 40 میلی‌گرم بر لیتر استفاده شده است. فاضلاب مذکور با رعایت نسبت بی‌هوازی بین کربن، نیتروژن و فسفر با استفاده از مواد شیمیایی مَلاس^۹، آمونیوم کلراید^{۱۰} ($0/007 \text{ g/g COD}$) و پتاسیم دی‌هیدروژن ارتوفسفات انیدروس^{۱۱} (g/g COD) (۰/۰۰۰۶) تهیه شد. سایر مشخصات کیفی فاضلاب ورودی

جدول ۱. مشخصات کیفی فاضلاب ورودی به راکتور

پارامتر (واحد)	مقدار
دما (°C)	45 ± 1
pH	$7/77 \pm 0/04$
COD (mg/L)	700 ± 40
TS ^{۱۳} (mg/L)	1258 ± 21
TDS (mg/L)	633 ± 4



شکل ۱. نتایج مقایسه جنس الکتروودهای مورد استفاده در سامانه بر اساس مدت زمان الکترولیز و انرژی الکتریکی مصرفی

جدول ۲. غلظت فلزات آزادشده به محیط با الکترولیز هر جنس الکتروود برای احیای یک واحد pH

غلظت فلزات آزاد شده به محیط به شکل اتمی (mg/L)					شرایط آزمایش			جنس الکترود
نیکل	آلومینیوم	مس	آهن	مدت الکترولیز (min)	چگالی جریان (mA/cm ²)	ولتاژ (V)	حجم (cc)	
۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۰	۷۶/۳۶	۳۵/۱	۵/۵۲	۱۰/۰	۵۰۰	آهن
۰/۲۴	۰/۱۳	۰/۰۰	۹۷/۸۷	۱۹۹/۶	۴/۰۲	۱۰/۰	۵۰۰	فولاد ضدزنگ
۴/۰۵	۰/۴۹	۳۴/۵۷	۷/۹۴	۵۹/۹	۴/۵۷	۱۰/۰	۵۰۰	مس
۰/۰۰	۱۶۲/۰	۰/۲۳	۱/۱۲	۹۰/۳	۳/۶۹	۱۰/۰	۵۰۰	آلومینیوم
۰/۰۰	۲/۳۱	۵۸/۲۶	۷/۹۲	۵۰/۷	۴/۴۰	۱۰/۰	۵۰۰	برنج

واحد pH، گزینه مناسبی برای استفاده در راکتورهای بی‌هوای نیست. همچنین الکترود آلومینیوم در مقایسه با الکترود آهن انرژی الکتریکی بیشتری برای احیای یک واحد pH مصرف می‌کند.

نتایج بررسی اقتصادی مندرج در جدول (۳) نشان دادند که هزینه تهیه الکترود آهن بسیار پایین‌تر از سایر موارد مورد آزمایش است و با توجه به ابعاد مورد نیاز، هزینه تهیه آن نسبت به فولاد ضدزنگ، مس، آلومینیوم و برنج به ترتیب برابر ۰/۱۷، ۰/۰۵، ۰/۲۹ و ۰/۰۷ است. در نتیجه هزینه کم‌تری برای جایگزینی دوره‌ای آن مورد نیاز است؛ بنابراین با در نظر گرفتن همه موارد، الکترود آهن برای استفاده در راکتور ABR بهینه‌ترین جنس است.

همچنین با توجه به نتایج آزمایش طیف‌سنجی که در جدول (۲) ارائه شده است و غلظت بازدارندگی برای هر فلز می‌توان دریافت که الکترودهای مس و برنج موجب آزاد شدن فلز مس بیش از حدود مجاز (۰/۵ mg/L) (محلول) و (۵۰-۷۰ mg/L (کل)) در فاضلاب می‌شوند (Tchobanoglous et al., 2014) و می‌توانند اثر بازدارندگی قوی بر رشد میکروارگانیسم‌های بی‌هوای داشته باشند؛ بنابراین برای استفاده در راکتورهای بی‌هوای مناسب نیستند. این در حالی است که فلز آهن تا غلظت ۱۲۰ میلی‌گرم بر لیتر جز مواد ریزمغذی برای رشد میکروارگانیسم‌ها محسوب می‌شود (Henze & Harremoes, 1983). از طرفی الکترود فولاد ضدزنگ به دلیل نیاز به مدت‌زمان طولانی و انرژی الکتریکی بالا برای احیای یک

جدول ۳. مقایسه هزینه تهیه الکترودهای مختلف

جنس الکترود	چگالی (g/cm ³)	قیمت واحد جرم (ریال/kg)	قیمت کل (ریال)
آهن	۷/۸۶	۲۰۰۰۰	۲۲۶۴
فولاد ضدزنگ	۷/۸۶	۱۲۰۰۰۰	۱۳۵۸۲
مس	۸/۹۶	۳۴۰۰۰۰	۴۳۸۶۸
آلومینیوم	۲/۷۰	۲۰۰۰۰۰	۷۷۷۶
برنج	۸/۲۶	۲۶۵۰۰۰	۳۱۵۲۰

pH اولیه (۶/۰۰)، ولتاژ (۱۰/۰ V) و دما (۳۵±۵ °C)، افزایش فاصله بین الکترودها و سطح تماس آن‌ها با فاضلاب به ترتیب موجب کاهش و افزایش شدت جریان الکتریکی می‌شود. علت این امر رابطه مستقیم مقاومت الکتریکی

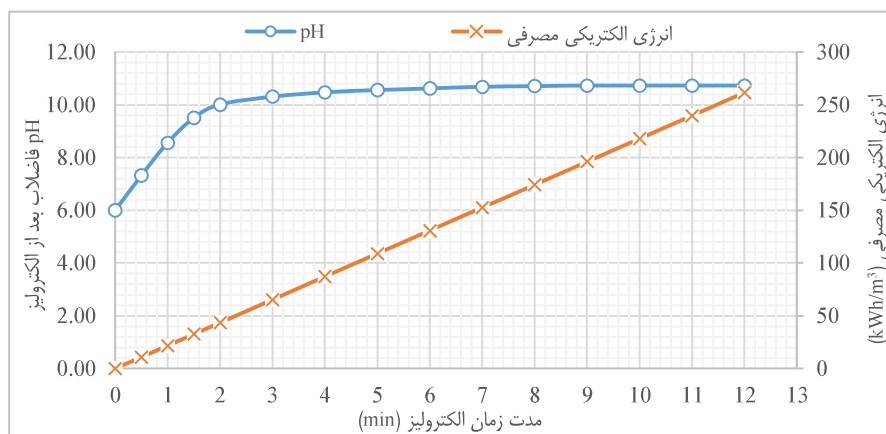
۳.۲. بررسی تأثیر فاصله الکترودها و سطح تماس آن‌ها با فاضلاب

نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از الکترود آهن نشان دادند که تحت شرایط یکسان از نظر مقدار

۳.۳. بررسی تأثیر مدت زمان الکترولیز

با افزایش مدت زمان الکترولیز، مقدار pH فاضلاب نیز افزایش می‌یابد. درحالی‌که میزان احیای pH در طول زمان (نرخ افزایش pH) رو به کاهش است. چراکه با گذشت زمان از شروع الکترولیز، افزایش آنیون‌های هیدروکسید و میزان قلیانیت فاضلاب مطابق رابطه (۱) و (۴) رخ می‌دهد. در نتیجه به واسطه خاصیت بافری، مقاومت در برابر تغییرات pH افزایش می‌یابد و این واکنش‌ها که نقش اصلی را در احیای pH ایفا می‌کنند، متوقف می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با اعمال چگالی جریان الکتریکی 8 mA/cm^2 به الکترودهای آهن، به‌گونه‌ای که بیش‌ترین حجم کنترل فاضلاب در معرض تأثیرگذاری الکترولیز قرار گیرد (فاصله الکترودها: 11 cm و سطح تماس آن‌ها با فاضلاب: 60 cm^2)، بعد از گذشت $1/5$ ساعت از شروع الکترولیز مقدار pH فاضلاب با شیب تقریباً ثابت به حدود $9/5$ می‌رسد و در واقع میزان احیای pH، $3/5$ واحد است. با صرف زمان و انرژی الکتریکی بیش‌تر، بعد از گذشت 12 ساعت میزان احیای pH به سمت صفر میل می‌کند و pH فاضلاب به مقدار ثابت $10/73$ می‌رسد؛ بنابراین با افزایش مدت زمان الکترولیز تا میزان معینی، کارآمدی سامانه و انرژی الکتریکی مصرفی بالا می‌رود (Chen et al., 2003).

محللول با فاصله بین الکترودها، رابطه معکوس آن با سطح تماس الکترودها و قانون اهم در خصوص محللول‌های الکترولیت است. با توجه به این‌که این دو اثر ناهم‌سو هستند، می‌توانند یکدیگر را خنثی کنند که این امر از دیدگاه اقتصادی و مصرف انرژی حائز اهمیت است. در صورتی‌که فاصله بین الکترودها بسیار کم باشد، احتمال ایجاد جریانات اتصال کوتاه^{۱۳} به دلیل کاهش مقاومت الکتریکی بالا می‌رود. از طرفی افزایش بیش‌ازحد فاصله الکترودها موجب کاهش انحلال یون‌های فلزی و در نتیجه پایین آمدن کارآمدی فرایند الکترولیز می‌شود؛ بنابراین توصیه می‌شود که این عامل با توجه به مشخصات فاضلاب موردنظر در حد متعادل نگه‌داشته شود (Alaadin, 2008). همچنین هر چه فاصله و سطح تماس الکترودها با فاضلاب بیش‌تر باشد، حجم کنترل بیش‌تری از فاضلاب در معرض تأثیرگذاری فرایند الکترولیز قرار می‌گیرد و کارآمدی این فرایند را از دیدگاه بهره‌برداری بهبود می‌بخشد (منظور از حجم کنترل فاضلاب، حجمی از فاضلاب است که بین دو سطح مقطع الکترودها تحت تأثیر الکترولیز قرار می‌گیرد).



شکل ۲. نتایج بررسی تغییرات pH فاضلاب بعد از الکترولیز و انرژی الکتریکی مصرفی سامانه برحسب مدت زمان الکترولیز

این‌که این شدت جریان در کل سطح تماس الکترودها با فاضلاب پخش می‌گردد، در واقع می‌توان نتیجه گرفت که میزان انحلال فلزات در فاضلاب تابعی از چگالی جریان

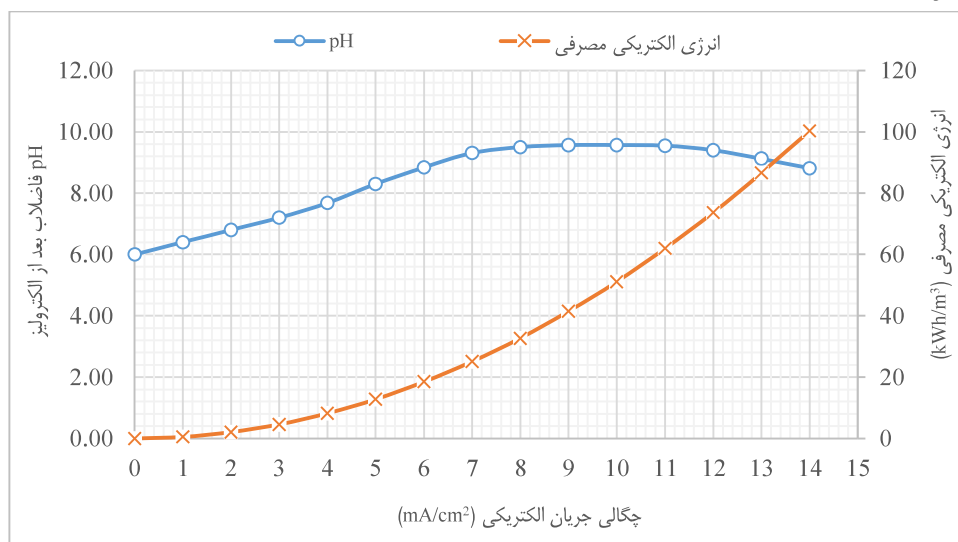
۴.۳. بررسی تأثیر چگالی جریان الکتریکی

میزان انحلال فلزات ناشی از فرایند الکترولیز در فاضلاب متناسب با شدت جریان الکتریکی است. با توجه به

محدوده (۸-۱۱ mA/cm²) بهترين محدوده برای چگالی جریان در مقياس آزمایشگاهی انتخاب شد. همان طور که بیان شد، فرایند الکترولیز موجب تشکیل و خروج حباب های گازی هیدروژن و اکسیژن می شود. این امر تا حدودی اختلاط مورد نیاز در اطراف الکترودها را موجب می شود و می تواند تماس بین مواد غذایی و زیست توده را تسهیل کند (Sarathai, 2010). همچنین مطابق رابطه (۳) با خروج گاز اکسیژن در اطراف آند، میزان اکسیژن محلول فاضلاب که از جمله عوامل بازدارنده فرایند بی هوازی است (Gerardi, 2006)، کاهش می یابد و برقراری شرایط بی هوازی را بهبود می بخشد. از طرفی خروج گاز هیدروژن توسط فرایند الکترولیز هنگامی که راکتور بی هوازی ترش شده است، یکی دیگر از قابلیت های الکترولیز برای احیای این راکتورها است؛ چراکه تا حدودی پاسخ گوی نیاز راکتور به مرحله هیدروژن خواری و حذف آن است (بدلیانس قلی کندی و همکاران، ۱۳۹۱).

الکتريکى است. بالا رفتن چگالی جریان سبب افزایش مبادله الکترون می گردد که این امر به نوبه خود سبب تسريع روند الکترولیز آب و اکسید و احیا شدن فلز می شود. در نتیجه کارآمدی فرایند الکترولیز برای احیای pH افزایش می یابد. این در حالی است که انحلال سریع فلزات در فاضلاب، منجر به افزایش هزینه های بهره برداری سامانه می گردد (Mikko, 2012).

در مدت زمان مشخص (۱/۵ ساعت) مطابق شکل (۳)، با افزایش چگالی جریان از حد معینی (۸ mA/cm²) مقدار pH فاضلاب به تدریج ثابت می شود. در چگالی جریان های بیش از (۱۱ mA/cm²) مقدار pH فاضلاب به دلیل تولید بیش از حد محصولات گازی، کاهش می یابد که این امر نشان دهنده کاهش کارآمدی سامانه الکترولیز برای احیای pH است. گازهای اکسیژن و هیدروژن تشکیل شده در رابطه (۳) و (۵) به ایجاد فضاهای خالی و افزایش مقاومت الکتريکى فاضلاب می انجامند؛ چراکه این فضاهای خالی به عنوان عایق الکتريکى عمل می کنند (Mahmoud et al., 2010)؛ بنابراین



شکل ۳. نتایج بررسی تغییرات pH فاضلاب بعد از الکترولیز و انرژی الکتريکى مصرفی سامانه برحسب چگالی جریان الکتريکى

ذرات باردار که در واقع حامل های الکترونی هستند، افزایش می یابد؛ بنابراین مقاومت الکتريکى فاضلاب کاهش یافته و انتقال الکترون به دلیل افزایش هدایت الکتريکى^{۱۴} (EC) تسهیل و تسريع می شود. این امر موجب افزایش

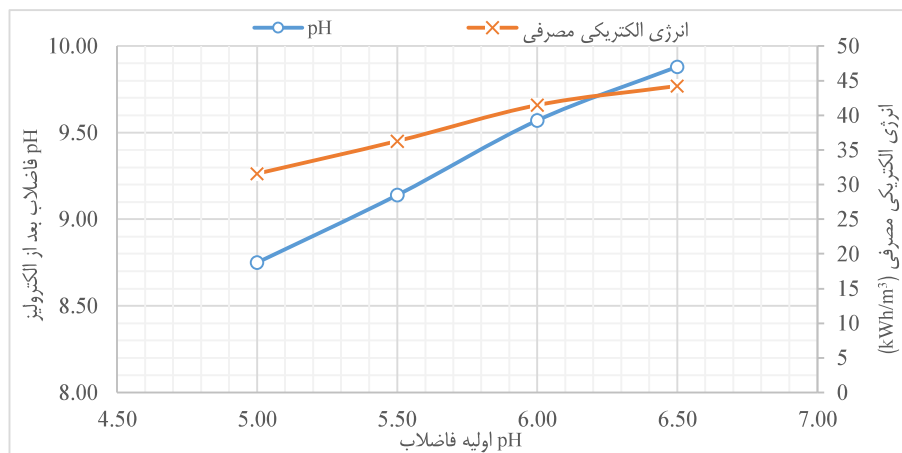
۳.۵. بررسی تأثیر غلظت جامدات محلول فاضلاب
 غلظت جامدات محلول فاضلاب (TDS) یکی از عوامل مؤثر بر میزان چگالی جریان الکتريکى است. بدین ترتیب که هر چه غلظت این مواد در فاضلاب بیش تر باشد، تعداد

در مقادیر pH بسیار بالا ($pH > 9$) به دلیل وجود $[Al(OH)_4^-]$ یا $[Fe(OH)_4^-]$ که مصرف‌کننده قلیانیت هستند، مقدار pH فاضلاب با انجام فرایند الکترولیز کاهش می‌یابد (Kobya et al., 2006; Sarkar et al., 2010). به منظور برقراری شرایط اسیدی و بررسی توانایی فرایند الکترولیز برای برگشت pH به شرایط خنثی و قلیایی، با توجه به حجم فاضلاب چند قطره اسیدسولفوریک به محلول افزوده شد تا pH اولیه آن در چند مرحله در محدوده 5/00، 5/50، 6/00 و 6/50 قرار گیرد. سپس نمونه‌های فاضلاب به مدت 1/5 ساعت و با چگالی جریان 9 mA/cm^2 ، تحت تأثیر فرایند الکترولیز قرار گرفتند که نتایج این بررسی در شکل (۴) نشان داده شده است. توجه به این نکته حائز اهمیت است که هر چه مقدار pH اولیه فاضلاب در حدود پایین‌تری قرار داشته باشد، احیای pH با سهولت بیشتر صورت می‌گیرد. دلیل آن را می‌توان افزایش میزان انحلال آهن و بالا رفتن غلظت جامدات محلول با کاهش pH اولیه فاضلاب دانست. با توجه به این امر مشهود است که در مقادیر pH اولیه پایین‌تر، میزان مصرف انرژی الکتریکی کم‌تر است.

شدت جریان الکتریکی و در نتیجه میزان چگالی جریان می‌شود. از این رو با افزایش غلظت جامدات محلول فاضلاب، برای افزایش شدت جریان تا حد مشخصی انرژی الکتریکی کم‌تری نیاز است. این امر به کاهش هزینه مورد نیاز برای تهیه منبع تغذیه می‌انجامد. با انتخاب آهن به عنوان الکتروود مورد استفاده، یون‌های آهن دو ظرفیتی (Fe^{2+}) وارد محلول شده و غلظت جامدات محلول و نیز رسانایی الکتریکی فاضلاب را افزایش می‌دهند. با گذشت زمان یون‌های آهن دو ظرفیتی به آهن سه ظرفیتی (Fe^{3+}) اکسید شده و می‌توانند به عنوان منعقد کننده عمل کنند و باعث کاهش غلظت مواد آلی و جامدات فاضلاب شوند.

۶.۳. بررسی تأثیر مقدار pH اولیه فاضلاب

در مقادیر pH بسیار اسیدی ($pH < 2$)، میزان قلیانیتی که در طول فرایند الکترولیز تولید می‌شود، برای احیای pH فاضلاب کافی نیست. درحالی‌که در مقادیر pH بالاتر ($pH > 3$)، با انجام فرایند الکترولیز، pH فاضلاب افزایش می‌یابد (Mouedhen et al., 2008).



شکل ۴. نتایج بررسی تغییرات pH فاضلاب بعد از الکترولیز و انرژی الکتریکی مصرفی سامانه بر حسب pH اولیه فاضلاب

راکتورهای بی‌هوای، در این تحقیق، بهینه‌سازی این فرایند در مقیاس آزمایشگاهی انجام پذیرفت. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۴. نتیجه گیری

بر اساس نتایج تحقیقات گذشته مبنی بر کارآمدی فرایند الکترولیز برای بهبود شرایط راهبری و ارتقای عملکردی

۱. بهترین جنس الکترود برای انجام بهینه فرایند الکترولیز از نظر مدت‌زمان موردنیاز و انرژی الکتریکی مصرفی برای احیای هر واحد pH، الکترود آهن است.

۲. افزایش حجم کنترل فاضلاب تحت تأثیر فرایند الکترولیز که با افزایش فاصله و سطح تماس الکترودها میسر می‌شود، کارآمدی سامانه را افزایش می‌دهد.

۳. میزان احیای pH فاضلاب با افزایش مدت‌زمان الکترولیز به سمت صفر میل می‌کند و در واقع pH فاضلاب به مقدار ثابتی می‌رسد.

۴. هر چه مقدار pH اولیه فاضلاب در حدود پایین‌تری قرار داشته باشد، احیای pH با سرعت و سهولت بیشتری صورت می‌گیرد که دلیل آن افزایش میزان انحلال یون‌های فلزی در فاضلاب است.

۵. مقادیر بسیار پایین یا بسیار بالای چگالی جریان الکتریکی موجب کاهش کارآمدی سامانه می‌شود؛ بنابراین محدوده بهینه برای چگالی جریان الکتریکی با توجه به میزان احیای pH فاضلاب، $8-11 \text{ mA/cm}^2$ در نظر گرفته شد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که فرایند الکترولیز تحت شرایط بهینه راهبری از لحاظ پارامترهای بهره‌برداری و اقتصادی گزینه‌ای مناسب برای ارتقای عملکردی راکتورهای بافل‌دار بی‌هوازی تصفیه فاضلاب است.

منابع

- بدلیانس قلی‌کندی، گ. ۱۳۸۵. شیمی آب، چاپ دوم، انتشارات نو پردازان، تهران.
- بدلیانس قلی‌کندی، گ. ۱۳۹۵. میکروبیولوژی جامع آب و فاضلاب، چاپ اول، انتشارات آبیژ، تهران.
- بدلیانس قلی‌کندی، گ.، جمشیدی، ش. و ولی پور، ع. ۱۳۹۱. استفاده از الکترولیز در ارتقای راهبری راکتورهای بی‌هوازی، محیط‌شناسی، ۴(۳۸): ۹-۱۶.
- بدلیانس قلی‌کندی، گ.، اینانلو بکلر، ب. و عموموها، م. ۱۳۹۹. بررسی عوامل مؤثر بر بازده حذف مواد آلی در راکتور بافل‌دار بی‌هوازی مجهز به سامانه الکترولیز، علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۴(۲۲): ۱۵-۲۷.
- Alaadin, B.A. 2008. Investigation of the electro-coagulation treatment process for the removal of total suspended solids and turbidity from municipal waste water. *Journal of Bioresource Technology*, 99(5): 914-921.
- Al Smadi, B. M., Al-Hayek, W. and Abu Hajar. 2019. Treatment of amman slaughterhouse wastewater by anaerobic baffled Reactor. *International Journal of Civil Engineering*, 17: 1445-1454.

۵. پیشنهادها

آنچه در این تحقیق پیشنهاد می‌شود، عبارت است از به‌کارگیری فرایند الکترولیز برای ارتقای عملکردی راکتور بافل‌دار بی‌هوازی در مقیاس نیمه‌صنعتی برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و بررسی اثر آن بر نرخ تولید بیوگاز و مشخصات لجن موجود در راکتور، برآورد عمر الکترودهای مورداستفاده در راکتور تحت شرایط مختلف راهبری و بررسی امکان استفاده مجدد از فلزات دورریز به‌عنوان الکترود جدید.

یادداشت‌ها

1. Anaerobic Baffled Reactor (ABR)
2. Substrate
3. Volatile Fatty Acids (VFA)
4. Electrical Current Density (i)
5. Chemical Oxygen Demand (COD)
6. Total Dissolved Solids (TDS)
7. Batch Reactor (BR)
8. Inductively Coupled Plasma (ICP)
9. Molasses ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{NNaO}_3\text{S}$)
10. Ammonium Chloride (NH_4Cl)
11. Potassium Di hydrogen orthophosphate Anhydrous (KH_2PO_4)
12. Total Solids (TS)
13. Short Circuit (SC)
14. Electrical Conductivity (EC)

- Public Health Association APHA. 2005. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21th edition, Water Environment Federation, Washington DC, USA.
- Aqaneghad, M. and Moussavi, G. 2016. Electrochemically enhancement of the anaerobic baffled reactor performance as an appropriate technology for treatment of municipal wastewater in developing countries. *Journal of Sustainable Environment Research*, 26(5): 203-208.
- Badalians Gholikandi, G., Jamshidi, S. and Hazrati, H. 2014. Optimization of anaerobic baffled reactor (ABR) using artificial neural network in municipal wastewater treatment. *Journal of Environmental Engineering and Management*, 13(1): 95-104.
- Bajpa, P. 2017. *Anaerobic reactors used for Wastewater Treatment*. In: *Anaerobic Technology in Pulp and Paper Industry Springer Briefs in Applied Sciences and Technology book series*, 1st edition, 37-53, Springer.
- Barber, W. P. and Stuckey, D.C. 1999. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: A review. *Journal of Water Research*, 33(7): 1559-1578.
- Bitton, G. 2005. *Wastewater Microbiology*, 3rd edition, Wiley & Sons, Inc.
- Chen, X., Chen, G. and Yue, P.L. 2003. Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Journal of Separation and Purification Technology*, 19(1-2): 65-76.
- Gerardi, M.H. 2003. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, Wiley & Sons, Inc.
- Gerardi, M.H. 2006. *Wastewater Bacteria*, Wiley & Sons, Inc.
- Henze, M. and Harremoes, P. 1983. Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors: A literature review. *Journal of Water Science and Technology*, 15: 1-101.
- Hubbe, M.A. Metts, J.R., Hermosilla, D., Blanco, M.A., Yerushalmi, L., Haghghat, F., Lindholm-Lehto, P., Khodaparast, Z., Kamali, M. and Elliott, A. 2016. Wastewater treatment and reclamation: a review of pulp and paper industry practices and opportunities. *Journal of Bioresources Technology*, 11(3): 7953-8091.
- Kobyas, M., Hiza, H., Senturka, E., Aydinera, C. and Demirbasb, E. 2006. Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Journal of Desalination*, 190(1-3): 201-211.
- Koparal, A. S. and Ogutveren, U. B. 2009. Electrocoagulation of vegetable oil refinery wastewater using aluminum electrodes. *Journal of Environmental Management*, 90(1): 428-433.
- Liu, R., Tian, Q. and Chen, J. 2010. The developments of anaerobic baffled reactor for wastewater treatment: A review. *African Journal of Biotechnology*, 9(11): 1535-1542.
- Mahmoud, A., Oliver, J., Vaxelaire, J. and Hoadley, A.F.A. 2010. Electrical Field: A historical review of its application in wastewater sludge dewatering. *Journal of Water Research*, 44(8): 2381-2407.
- Martinez-Huitle, C.A., Rodrigo, M. A. and Scialdone, O. 2018. *Electrochemical Water and Wastewater treatment*, Elsevier Publication.
- Moges, M. E., Todt, D., Janka, E., Heistad, A. and Bakke, R. 2018. Sludge blanket anaerobic baffled reactor for source separated black water treatment. *Journal of Water Science & Technology*, 78(6): 1249-1259.
- Mikko, V. 2012. *Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and Wastewaters*, Espoo, VTT Science 19.
- Mouedhen, G., Feki, M., Wery, M.D.P. and Ayedi, H.F. 2008. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, 150(1): 124-135.
- Putra, A.A., Watari, T., Maki, Sh., Hatamoto, M. and Yamaguchi, T. 2020. Anaerobic baffled reactor to treat fishmeal wastewater with high organic content. *Journal of Environmental Technology & Innovation*, 17, 100586.
- Radjenovic, J. and Sedlak, D.L. 2015. Challenges and opportunities for electrochemical processes as next-generation technologies for the treatment of contaminated water. *Journal of Environmental Science and*

- Technology*, 49(19): 11292–11302.
- Sahu, O., Rao, D.G., Gopal, R., Tiwari, A. and Pal, D. 2017. Treatment of wastewater from sugarcane process industry by electrochemical and chemical process: Aluminum (metal and salt). *Journal of Water process Engineering*, 17: 50-62.
- Sarathai, Y., Koottatep, T. and Morel, A. 2010. Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onsite wastewater treatment system. *Journal of Environmental Sciences*, 22(9): 1319-1326.
- Sarkar, M.S.K.A., Evans, G. M. and Donne, S.W. 2010. Bubble size measurement in electro-flotation. *Journal of Minerals Engineering*, 23(11-13): 1058–1065.
- Sasson, M.B., Calmano, W. and Adin, A. 2009. Iron-oxidation processes in an electro-flocculation (electrocoagulation) cell. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3): 704–709.
- Sevki, Y.Y., Savas, K.A., Sahset, I. and Bulent, K. 2007. Electrocoagulation of synthetically prepared waters containing high concentration of NOM using iron cast electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 139(2): 373–380.
- Tahreem, A., Jami, M.S. and Ali, F. 2020. Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. *Journal of Water Process Engineering*, 37:101440.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H.D., Tsuchihashi, R. and Burton, F. 2014. *Wastewater engineering treatment and reuse*, 5th edition, Metcalf & Eddy Inc. McGraw-Hill Companies, Inc.