

A Review on Performance of Rotating Biological Contactor for Phenolic Wastewater Treatment

Vahab Ghaleh Khondabi¹, Alireza Fazlali^{2*},
Mohammad Arjomandzadegan³

1- PhD Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

2- Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

3- Associate Professor, Department of Microbiology, Infectious Diseases Research Center, Arak University of Medical Sciences, Arak, Iran.

*Corresponding author, Email: a-fazlali@araku.ac.ir

Received: 6/10/2018

Revised: 7/2/2019

Accepted: 10/2/2019

Abstract

Phenolic compounds are amongst the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and are the most important environmental pollutants found in the waste effluent of many industries, including refineries, petrochemicals, steel industries, and iron foundries, with an average concentration of 10 to 2000 mg/l. Removing these compounds before releasing them in nature and reusing wastewater is accordingly of particular importance. Among phenol removal methods, biodegradation is an environmental friendly and cost effective method and rotating biological contactor (RBC) system is in particular recognized as one of the most efficient attached growth fixed bed wastewater treatment processes for stationary and advanced treatment with phenol removal efficiency of 85 to 99%. The advantages of RBC include resistance to hydraulic and organic shocks, little chance of creating anaerobic conditions, high sedimentation rate of sludge produced, low space requirements, very low energy costs, simplicity and easiness of operation, no need of expert personnel for supervision and operation, and low maintenance costs. The present review introduces RBC system, comparing with other phenolic purification methods, expressing the history, the reactor design and the operational parameters affecting it. Also the previous researches on phenol removal by RBC system has been evaluated.

Keywords: Attached growth biological treatment, Phenol, Rotating biological contactor, Wastewater.

مروری بر عملکرد سیستم تماس دهنده بیولوژیکی دوار برای تصفیه پساب‌های فنولی

وهب قلعه خندابی^۱، علیرضا فضلعلی^{۲*} و محمد ارجمندزادگان^۳

۱ - دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

۲ - دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

۳ - دانشیار، گروه میکروبیولوژی، مرکز تحقیقات بیماری‌های عفونی، دانشگاه علوم پزشکی اراک، اراک، ایران.

* نویسنده مسئول، ایمیل: a-fazlali@araku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۴

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۷/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۱

چکیده

ترکیبات فنولیک جزء هیدروکربن‌های آروماتیک حلقوی (PAHs) و مهم‌ترین آلاینده‌های محیط‌زیست هستند که در پساب بسیاری از صنایع از جمله پالایشگاه، پتروشیمی، صنایع فولاد سازی و کارخانه ذوب‌آهن با میانگین غلظت ۱۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر یافت می‌شوند. حذف این ترکیبات قبل از رها کردن آن‌ها در طبیعت و استفاده مجدد از پساب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از میان روش‌های حذف فنول، تصفیه زیستی یک روش دوست‌دار طبیعت و مقرون به‌صرفه به‌حساب می‌آید. در این بین سیستم تماس دهنده بیولوژیکی دوار (RBC) به‌عنوان یکی از کارآمدترین فرآیندهای تصفیه پساب رشد چسبیده بستر ثابت برای تصفیه ثانویه و پیشرفته با راندمان ۸۵ تا ۹۹ درصد در حذف فنول شناخته می‌شود. از مزیت‌های تماس دهنده‌های بیولوژیکی دوار می‌توان به مقاومت در مقابل شوک‌های هیدرولیکی و آلی، احتمال کم ایجاد شرایط بی‌هوازی، خاصیت ته‌نشینی بسیار بالای لجن تولید شده، نیاز به فضای کم، هزینه‌تأمین انرژی بسیار پایین، سادگی و سهولت در راهبری و بهره‌برداری، عدم نیاز به افراد متخصص برای نظارت و بهره‌برداری و هزینه تعمیر و نگهداری پایین اشاره کرد. بررسی حاضر به معرفی سیستم RBC، مقایسه آن با دیگر روش‌های تصفیه فنول، بیان تاریخچه و نحوه طراحی راکتور و پارامترهای عملیاتی اثرگذار بر روی آن می‌پردازد. در پایان پژوهش‌های پیشین در زمینه حذف فنول توسط سیستم RBC مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: پساب صنایع، تصفیه بیولوژیکی رشد چسبیده، دیسک‌های بیولوژیکی دوار، فنول.

کربن دی‌اکسید و آب) تحت شرایط هوایی، بی‌هوایی و یا هوایی اختیاری استفاده می‌کنند. یک نسبت (۱:۵:۱۰۰) C:N:P برای رشد میکروارگانیسم‌ها کافی است (Chan et al., 2010). فرآیندهای بیولوژیکی به رشد معلق، رشد چسبیده و فرآیندهای هیبریدی تقسیم می‌شوند. در فرآیند رشد چسبیده، میکروارگانیسم‌ها به یک ماده خنثی (سنگ، فلز یا پلاستیک) که قابلیت تولید بیوفیلم داشته باشد، می‌چسبند (Hsien and Lin, 2005). فرآیندهای فیلم ثابت، از سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی رشد چسبیده هستند، که می‌توان آن‌ها را به بیوراکتور بستر سیال (FBB) صافی چکنده (TF) و RBC تقسیم‌بندی کرد (Chavan and Mukherji, 2002).

در سیستم‌های لجن فعال (ASS)، جامداتی که قابلیت ته‌نشین شدن دارند به‌وسیله تانک‌های ته‌نشینی که بعد از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی قرار می‌گیرند، جداسازی می‌شوند. در طول سال‌ها، ASS به‌منظور برآورده کردن کیفیت بالای خروجی واحدهای تصفیه پساب، بهبود یافت. سیستم‌های تصفیه جدید در جهت غلبه بر ضعف‌های ASS گسترش یافتند (Ganczarzyk, 1983). مقایسه فرآیندهای توسعه یافته با سیستم لجن فعال نشان می‌دهد که سیستم RBC نیاز به طراحی فرآیند و عملیات پیچیده‌تر (Dold, 1989) و هزینه‌های بیشتری برای ساخت و نگهداری راکتور نسبت به ASS دارد (Cassidy et al., 2000). همچنین عملکرد خیلی خوبی در حذف سمیت از خود نشان داده است (Gonzalez et al., 2007). در نهایت قابلیت خوبی برای ته‌نشینی لجن براساس طراحی راکتور دارد. ذرات بیولوژیکی درون راکتور باقی می‌مانند و به‌دلیل ته‌نشینی خوب لجن، احتمال کمی برای خارج شدن جامدات معلق وجود دارد (Dold, 1989).

۲- تاریخچه دیسک‌های بیولوژیکی چرخان

اولین بار این سیستم توسط ویگند در سال ۱۹۲۸ در کشور آلمان برای تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار گرفت. وسیله او با عنوان "توده هوایی چرخان" ثابت شده بر روی یک مدیای نگهدارنده معرفی شد (Chan and Stenstrom, 1981). همچنین اولین پلنت در سال ۱۹۲۹ در آمریکا با نام "صافی تماس دهنده" یا "چرخ بیولوژیکی"، که شامل یک‌سری چرخ‌های پره‌دار بود که در فاضلاب غوطه‌ور بوده و اکسیژن محلول فاضلاب را افزایش داده و مواد آلی را کاهش می‌داد، توسط آلن و ملابی ثبت شد و در همان سال دومان در آمریکا روی دیسک‌های فلزی که به‌طور موازی کنار هم قرار گرفته بودند کار کرد ولی نتیجه‌بخش نبود (Doman, 2008). پروفیسور پوپل سیستم RBC را در اواخر دهه ۱۹۵۰ در دانشگاه استاتنگرت آلمان غربی توسعه داد که این

فنول با فرمول C_6H_5OH و وزن مولکولی $94/11 \text{ g/mol}$ در حالت خالص بی‌رنگ یا جامد سفید است که به‌شدت سمی بوده و در اشکال گوناگون و یا در ارتباط با عناصر دیگر به فراوانی یافت می‌شود (Rappoport, 2003). این ماده و مشتقات آن در صنایع متعددی از جمله صنایع تولید رزین، رنگ، سموم دفع آفات، داروسازی، معادن زغال سنگ و صنایع آلومینیوم کاربرد دارد (Patterson, 2003). به‌علت کاربرد گسترده فنول در فرآیندهای صنعتی، این آلاینده به‌طریق مختلف به محیط‌زیست وارد می‌شود. با توجه به ویژگی فنول نظیر حلالیت زیاد در آب و پایداری در محیط زیست، این ترکیب برای مدت‌زمان طولانی در محیط باقی می‌ماند و از طریق منابع آب قادر به انتقال تا مسافت‌های طولانی است (Kinsley and Nicell, 2000). ترکیبات فنولی به‌دلیل ویژگی‌های خاص نظیر سمیت، اثر بر طعم و بوی آب و اثر سوء بر سلامت انسان و موجودات زنده، براساس طبقه‌بندی آژانس حفاظت محیط‌زیست امریکا (USEPA) یکی از ۱۲۹ آلاینده دارای اولویت در سال ۱۹۷۷ شناخته شده است و سازمان جهانی محیط‌زیست (WHO) مقدار مجاز فنول در پساب خروجی صنایع را $0/5 \text{ mg/l}$ تعیین نموده است (DEFRA-EA, 2002).

برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی فنول، روش‌های متعددی نظیر جذب سطحی (Dabrowski et al., 2005)، فیلترهای غشایی (Bodalo et al., 2009)، اکسیداسیون نوری (Iliev et al., 2002)، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) (با استفاده از، اشعه ماورای بنفش، هیدروژن پراکسید و فرآیند فنتون) (Murray and Parsons, 2004)، تخریب فتوکاتالیستی (Akbal and Nur onar, 2003)، روش‌های حذف آنزیمی (Singh and Singh, 2002) و تصفیه بیولوژیکی (Freeman, 2003) وجود دارد. در بین روش‌های بیان شده، سیستم‌های بیولوژیکی به‌دلیل مزایای خاصی که نسبت به سایر روش‌ها دارند، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، یکی از مزایای عمده این روش‌ها، سازگاری بیشتر با محیط‌زیست است (Kehma and Reed, 2003). همچنین در این روش، هیچ‌گونه ماده شیمیایی زیان‌آوری برای محیط‌زیست مصرف نمی‌شود، لذا دفع پساب و لجن حاصل از این فرآیندها نسبت به فرآیندهای شیمیایی، اثرات سوء کمتری در منابع پذیرنده به‌دنبال دارد (Tchobanoglous et al., 2003). روش‌های فیزیکوشیمیایی دارای معایبی از قبیل قیمت بالا، بازده پایین، مصرف انرژی زیاد و تولید لجن حاوی آهن بوده در حالی که روش تجزیه زیستی آسان، موثر و ارزان قیمت است (Ahmad et al., 2011).

فرآیندهای بیولوژیکی از میکروارگانیسم‌ها به‌منظور اکسیداسیون مواد آلی و تبدیل آن‌ها به محصولات ساده (متان،

سرآغازی بر ساخت اولین RBC با مقیاس صنعتی در آلمان در سال ۱۹۶۰ بود (Rodgers and Zhan, 2003).

تغییرات عمده در شکل‌بندی سیستم و جنس دیسک‌ها پس از مقبولیت استفاده از پلی‌استایرن در دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ صورت پذیرفت. سیستم‌های RBC از سال ۱۹۷۹ با ساخت بیش از ۲۰۰ کارخانه در غرب آمریکا عمومیت یافتند (Leslie Grady et al., 1999). عمده کاربرد دیسک دوار بیولوژیکی در ایالات متحده مربوط به فرایند حذف اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD_5) و یا نیتروژن آمونیاکی (NH_3-N) و یا هر دو این موارد در روند تصفیه فاضلاب است. از لحاظ کمیت کاربرد سیستم دیسک دوار بیولوژیکی اشاره به این نکته لازم است که هم‌اکنون در حدود ۶۰۰ تصفیه‌خانه فاضلاب‌های شهری و بیش از ۲۰۰ تصفیه‌خانه فاضلاب‌های صنعتی در ایالات متحده و همچنین بیش از ۱۰۰۰ تصفیه‌خانه در اروپا به روش دیسک دوار بیولوژیکی در حال فعالیت هستند (Metcalf and Eddy et al., 2013).

۳- شرح فرآیند RBC

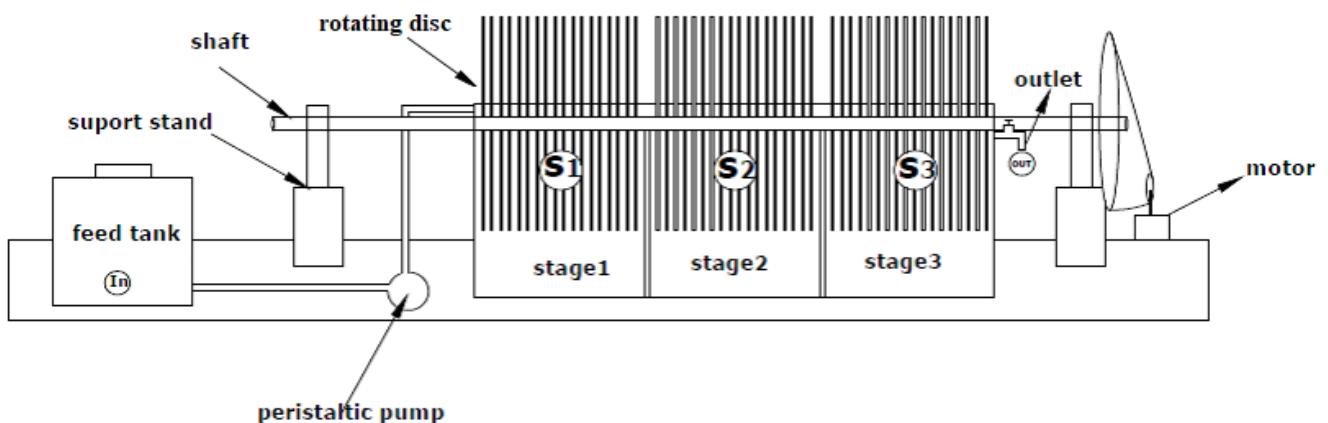
تماس دهنده‌های بیولوژیکی چرخان (شکل ۱) (Ebrahimi et al., 2009; Najafpour et al., 2006) یک راکتور بیولوژیکی فیلم ثابت و رشد چسبیده است که معمولاً برای حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، BOD و فرایند نیتریفیکاسیون استفاده می‌شوند. این تماس دهنده‌ها به‌طور معمول از تعدادی دیسک صاف یا شیاردار نزدیک به هم از جنس پلی‌استایرن، پلی‌اتیلن، فوم پلی‌اورتان، پلی‌وینیل کلراید، پلی‌متیل متاکریلات، پلی‌اتیلن دانسیته بالا و پلکسی گلاس تشکیل شده‌اند. این صفحه‌ها حدود ۴۰٪ در فاضلاب غوطه‌ور بوده و به‌آرامی با کمک نیروی محرکه وارد بر شافت که این صفحه‌ها بر آن سوار هستند می‌چرخند و در حین این عمل لایه بیوفیلمی به ضخامت ۴-۱ mm بر روی

دیسک‌ها تشکیل شده و عمل تصفیه انجام می‌پذیرد (Bitton, 2005). سیستم‌های بیولوژیکی دوار معمولاً شامل تجهیزاتی همچون مدیا، شافت، نیروی چرخاننده (نیروی مکانیکی یا دیفیوزر هوایی)، راکتور، پوشش و تجهیزات جانبی می‌شوند و آن‌ها را می‌توان به دو طریق سری و موازی کنار هم قرار داد و در صورت نیاز می‌توان با استفاده از بافل آن‌ها را بین ۶-۲ بخش مرحله‌بندی کرد (Wick, 2001).

۴- طراحی راکتور RBC

به‌منظور طراحی RBC، پارامترهای قطر و ضخامت دیسک‌ها، فاصله بین آن‌ها، درصد مستغرق بودنشان درون پساب، دبی جریان، زمان ماند هیدرولیکی و نرخ بار هیدرولیکی هرکدام در یک مقدار مشخص (در محدوده استاندارد مقیاس موردنظر) فرض می‌شوند. دقت طراحی توسط پیدا کردن مقادیر پارامترهای دیگر (مساحت و تعداد دیسک‌های موردنیاز، طول راکتور و شافت) و اطمینان حاصل کردن از این‌که این مقادیر در محدوده مجاز از معیارهای طراحی است (بررسی نرخ بار آلی)، ارزیابی می‌شود (Christian, 2013).

پارامترهای عمده تاثیرگذار بر عملکرد RBC را می‌توان در سه بخش فیزیکی، بیوشیمیایی و میکروبیولوژی طبقه‌بندی کرد. در جایی‌که پارامترهای فیزیکی شامل نرخ بارگذاری هیدرولیکی (HLR) (نسبت دبی حجمی جریان پساب ورودی به مساحت دیسک‌ها)، زمان اقامت هیدرولیکی (HRT) (نسبت حجم مخزن به جریان ورودی پساب)، دما (T)، سرعت چرخش دیسک‌ها (ω) و درصد استغراق دیسک‌ها (Ω) و پارامترهای بیوشیمیایی: نرخ بارگذاری آلی (OLR) (نسبت BOD پساب ورودی به مساحت دیسک‌ها)، اکسیژن محلول (DO)، pH و قلیائیت و پارامترهای میکروبیولوژی: باکتری و میکروارگانیسم‌ها هستند (WEF, 1998; Culp and Heim, 1978).



شکل ۱- شماتیک دیاگرام راکتور RBC (Ebrahimi et al., 2009; Najafpour et al., 2006)

از ۹۰٪ رسیده است. ۲- کلروفنول تنها به صورت جزئی در RBC قابل تجزیه بیولوژیکی بوده و اغلب نباید بازده حذف بالای ۵۰٪ انتظار داشت.

Tyagi et al. (1993) به مطالعه تجزیه بیولوژیکی پساب پالایشگاه نفت توسط سیستم RBC پرداختند و لجن فعال واحد تصفیه پالایشگاه و شهری را به سیستم تلفیق کردند. پس از ۳ روز یک بیوفیلم نازک بر روی دیسک مشاهده شده و بعد از آن خوراک را به ۱۰۰٪ پساب پالایشگاه تغییر دادند. در این بررسی، سیستم پس از ۳-۲ هفته به حالت پایدار رسید. آن‌ها در این مطالعه به ترتیب برای COD، روغن، آمونیوم نیتروژن و فنول به راندمان حذف ۸۷٪، ۸۰٪، ۹۹٪ و ۸۵٪ دست یافتند.

Banerjee (1997) عملکرد حذف فنول در پساب سنتتیکی را در راکتور RBC مورد تحقیق و بررسی قرار داد. گروه باکتری‌های عمده‌ای که مسولیت تصفیه میکروبی فنل تا غلظت ۴۲۰ mg/l را برعهده داشته، گونه‌هایی از پ سودوموناس شناسایی شدند. او پس از آن که رشد قابل مشاهده از بیومس به رنگ طلائی-قهوه‌ای را بعد از ۲ هفته بر روی دیسک‌ها ملاحظه کرد، مطالعه بر روی سیستم به صورت پیوسته را شروع کرد. تاثیر متغیرهای مهم فرایندی و عملیاتی، همچون؛ غلظت فنول ورودی، بار فنول ورودی، بار هیدرولیکی ورودی، دمای پساب و سرعت چرخش دیسک‌ها بر روی بازده حذف در سیستم آزمایش کرد. یک واکنش مرتبه اول به همراه یک ثابت سرعت متوسط (K_c) با مقدار h^{-1} ۰/۱۳-۰/۱۰ در یک محدوده دمایی $^{\circ}C$ ۲۷-۲۰/۵ برای تجزیه فنول مشاهده کرد. در حالت کلی تصفیه پساب فنول دار در راکتور RBC، عملکرد حذف بهینه در انتهای مرحله دوم قابل ملاحظه بوده است. عملکرد حذف فنول در غلظت‌های بالای فنول ورودی بهبود یافته، در حالی که عملکرد حذف با افزایش بار هیدرولیکی ورودی بدتر شده است. تاثیر دما در بهبود بازده حذف در محدوده دمایی $^{\circ}C$ ۳۶-۱۳ چشمگیر بوده و نقش مثبت سرعت چرخش دیسک‌ها در تصفیه پساب قابل ذکر بوده است.

Radwan and Ramanujam (1997) از یک راکتور RBC اصلاح شده برای مطالعه تصفیه‌پذیری پساب سنتتیکی ۴،۲-دی کلروفنول (2,4CP) استفاده کردند. پساب سنتتیکی با غلظت ورودی ۲۰۰-۴۰ mg/l از ۴،۲-دی کلروفنول آماده کردند. چهار نرخ بار هیدرولیکی در محدوده $m^3.m^{-2}.d^{-1}$ ۰/۰۶۵-۰/۰۲۴ و نرخ بار آلی در محدوده g 2,4 CP. $m^{-2}.d^{-1}$ ۱۳-۲ مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها تاثیر بار هیدرولیکی و غلظت ورودی ۴،۲-دی کلروفنول را برای راندمان حذف ۴،۲-دی کلروفنول مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که ماکزیمم حذف در بارهای هیدرولیکی ۰/۰۲۴ و $m^3.m^{-2}.d^{-1}$ ۰/۰۴۶ و همچنین یک مدل ریاضی را با استفاده از تحلیل رگرسیون برای آن پیش‌بینی کردند.

در طی سال‌ها مطالعات زیادی بر روی سیستم های RBC انجام گرفته است. در زیر به تحقیقات صورت گرفته در زمینه تصفیه پساب فنولی پرداخته می‌شود. همچنین پارامترهای طراحی سیستم دیسک‌های بیولوژیکی دوار که در این تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته، در جدول ۱ جمع‌آوری شده است. بدین منظور به بانک اطلاعاتی Science Direct و Scopus برای بررسی مقالات چاپ شده در مجلات این حوزه در انتشارات Elsevier, Taylor & Francis و Whiley, Springer مراجعه شده است.

Harlow et al. (1938) برای اولین بار از روش‌های بیولوژیکی در تصفیه پساب فنولی استفاده کرد. بعد از سال‌ها، میکروبی‌های مقاوم به فنول در شکل‌های میله‌ای و کروی از صافی چکنده یافت شدند (Hamdy et al., 1956). Yang and Humphrey (1975) گزارش دادند که امکان کاهش فنول در پساب تا غلظت ۲ mg/l-۱ توسط یک سیستم تک مرحله‌ای ناپیوسته RBC وجود دارد. بازده حذف فنول و محدوده تغییرات خواص پساب فنولی در صورت وجود لایه بیوفیلم بیشتر از عدم وجود آن است (Molin and Nilsson, 1985). Bracewell et al. (1980) بر روی تصفیه پساب رزین فنول-فرمالدهید توسط RBC مطالعاتی را انجام دادند که اهدافی همچون مشخص کردن تاثیر غلظت فنول ورودی، دامنه تغییرات نرخ بار آلی و تعریف رابطه‌ای بین بازده حذف و دیگر پارامترها را دنبال کردند.

Choung et al. (1988) به بررسی تصفیه پساب فنولی سنتتیکی در RBC پرداختند. آن‌ها تاثیر هر یک از پارامترهای سرعت چرخش، غلظت فنول ورودی و نسبت حجم راکتور به مساحت دیسک‌ها (G) بر روی تصفیه در RBC را مورد مطالعه قرار دادند. در حالی که غلظت فنول ورودی ۳۱۴-۵۰ mg/l بوده، غلظت خروجی کمتر از ۲ mg/l حاصل شده است و در واقع راندمان حذف بالای ۹۵٪ به دست آمده است. سرعت حذف مواد آلی را به عنوان یک واکنش مرتبه اول بین ورودی و خروجی نشان دادند. افزایش سطح دیسک سبب بهبود بازده حذف شده اما در $G > ۸/۲$ سرعت افزایش بازده، کاهش می‌یابد. سرعت چرخش دیسک‌ها، بازده حذف را افزایش می‌دهد اما در مورد سرعت چرخش ۵۰ دور در دقیقه، در لجن گیرافتادن بیومس چسبیده، سبب کاهش بازده می‌شود.

Tokuz (1989) تصفیه پساب فنولی سنتتیکی در RBC را مورد مطالعه قرار داد. در این بررسی مدت زمان ۳ ماه برای تشکیل بیوفیلم بر روی دیسک‌ها طول کشید. نرخ حذف بالای ۹۰٪ COD در حضور ۱۱ mg/l از ۲-نیتروفنول و نرخ حذف بالای ۸۵٪ COD در حضور ۳ mg/l از ۲-کلروفنول قابل دسترسی بوده است. در این مطالعه، بازده حذف ۲-نیتروفنول به ندرت به کمتر

Israni et al. (2002) تجزیه بیولوژیکی پساب فنولی سنتتیکی را در یک راکتور RBC مطالعه کردند. آن‌ها یک نمونه لجن از تانک هوادهی ثانویه واحد تصفیه پساب پتروشیمی که مقدار فنول آن در محدوده 20-15 mg/l بود، برای القاح به سیستم جمع‌آوری کردند و سیستم مدت زمان 3 ماه را در مرحله سازگاری میکروارگانیسم‌ها با فنول در غلظت‌های 200-50 mg/l سپری کرد. یک رشد قابل مشاهده از بیومس بر روی دیسک‌ها بعد از یک هفته از تلقیح ملاحظه کردند. آن‌ها تاثیر متغیرهای فرایندی مانند: سرعت چرخش دیسک، بار فنول ورودی، بار هیدرولیکی ورودی و دمای پساب بر روی مقدار حذف فنول ورودی سیستم تحقیق کردند و مشاهده نمودند که افزایش دما، سرعت چرخش دیسک‌ها و نرخ بار آلی سبب بهبود در عملکرد سیستم شده و برعکس افزایش در نرخ بار هیدرولیکی سبب کاهش در نرخ حذف فنول می‌شود.

Alemzadeh et al. (2002) عملکرد حذف فنول در پساب سنتتیکی در RBC را مورد مطالعه قرار دادند. مرحله سازگاری میکروبی را در مدت 4 ماه تا غلظت 200 mg/l از فنول انجام دادند و مخلوط 50/50 از لجن فعال کشتارگاه و شهری را به سیستم تلقیح کردند. پس از یک هفته یک لایه بیوفیلم نازک بر روی سطح دیسک‌ها مشاهده کردند. آن‌ها تاثیر متغیرهای اصلی فرایندی و عملیاتی، مانند: بار هیدرولیکی ورودی، بار COD ورودی و دمای پساب بر روی بازده حذف کلی سیستم آزمایش کردند. آن‌ها مشاهده کردند که عملکرد حذف فنول با افزایش بار هیدرولیکی بدتر شده و بازده بهینه کلی حذف فنول در بار آلی $0.4/100 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ و غلظت COD 800 mg/l، 99/99٪ است. در حالت کلی در تصفیه پساب حاوی فنول در RBC، عملکرد حذف بهینه در پایان مرحله دوم در مقایسه با مرحله اول مشاهده شده، اما مرحله سوم تاثیر چشمگیری بر روی بازده حذف فنول نداشته است. تاثیر دما در افزایش بازده حذف فنول در محدوده دمایی 43-13 °C بیشتر بوده و شرایط عملیاتی در دمای 36 °C در حالت بهینه خود قرار دارد. مطالعه مکانیسم‌های متفاوت حذف فنول نشان می‌دهد که 10٪ فنول توسط جذب سطحی فیزیکی و تبخیر شدن در راکتور RBC حذف می‌شود.

Melo et al. (2005) لجن فعال یک واحد تصفیه پساب پتروشیمی را که یکی از اجزای آن فنول بود، خریداری و به فنول تا غلظت 400 mg/l سازگاری دادند. برای تجزیه بیولوژیکی فنول از یک سیستم راکتور ناپیوسته و یک راکتور RBC استفاده کردند. تجزیه فنول را در راکتور ناپیوسته در خصوص بررسی تامین اکسیژن و به‌علاوه تاثیر غلظت بیومس مطالعه کردند. آن‌ها با توجه به نرخ تجزیه فنول تائید کردند که عملکرد سیستم با افزایش اکسیژن بهبود یافته است. به‌همین ترتیب، متناسب با

سرعت چرخش دیسک‌ها، ضریب انتقال جرم اکسیژن افزایش افزایش یافته که در نتیجه آن تجزیه فنول بهبود یافته است. Pradeep et al. (2011) به بررسی بازده حذف فنول در یک پساب سنتتیکی در راکتور RBC پرداختند. آن‌ها آزمایش‌ها را پس از 10 روز و بعد از آن که یک بیوفیلم قهوه‌ای رنگ قابل مشاهده بر روی دیسک‌ها ملاحظه شد، شروع کردند و تاثیر متغیرهای فرایندی همچون غلظت فنول، سرعت چرخش و مستغرق بودن دیسک‌ها بر روی حذف فنول آزمایش کردند. آن‌ها حذف فنول 99٪ را در غلظت‌های 180-40 mg/l و بدتر شدن عملکرد راکتور را با افزایش غلظت فنول تا 200 mg/l مشاهده کردند. با افزایش سرعت چرخش دیسک‌ها، اکسیژن محلول افزایش و زمان اقامت هیدرولیکی کاهش یافته است و همچنین افزایش درجه مستغرق بودن دیسک‌ها سبب کاهش زمان اقامت هیدرولیکی شده است.

Duque et al. (2011) عملکرد RBC در بارهای شوک از 2- فلوتور فنول (2-FP) تحقیق کردند. آن‌ها در یک دوره زمانی 2 ماهه بار شوک آلی 25 mg/l از 2-FP را به‌کار گرفتند. از آنجایی که هیچ‌گونه تجزیه بیولوژیکی از 2-FP مشاهده نکردند، سویه تجزیه کننده 2-FP به RBC اضافه کردند و در مدت زمان 6 ماه، بار شوک آلی از 2-FP را در محدوده 200-25 mg/l به‌کار گرفتند. سیستم به مدت 18 روز به‌صورت ناپیوسته کار کرده و از روز 19 به بعد به‌حالت پیوسته تغییر کرد. تجزیه بیولوژیکی کامل از 50 mg/l از 2-FP در طول عملیات راکتور مشاهده شد.

Khalil Ariya et al. (2012) تحقیقاتی را بر روی یک سیستم دوار بیولوژیکی متعارف برای حذف هیدروکینون (از ترکیبات فنلی با زنجیره آروماتیک) از فاضلاب سنتزی صورت دادند و نتایج حاصله را با نتایج خروجی از پایلوت RBC با سید محتوی آکنه تحت بارگذاری‌های آلی و هیدرولیکی برابر مورد مقایسه قرار دادند. مطابق با نتایج گزارش شده، کارایی سیستم دیسک دوار متعارف و سیستم با سید محتوی آکنه در حذف COD به‌ترتیب برابر 92٪ و 88٪ بوده است. همچنین با افزایش سرعت گردش دیسک‌های دوار از 10 rpm به 12/5 rpm راندمان حذف سیستم کاهش پیدا کرده است.

Mirkhalili and Mirbagheri (2012) از پساب خروجی واحد شناورسازی با هوای محلول (DAF) تصفیه‌خانه و لجن خط برگشت سیستم لجن فعال پالایشگاه نفت شهید تندگویان تهران با نسبت ترکیبی 2/3 از DAF و 1/3 از خط برگشت لجن فعال در ران 1 و به‌طور عکس در ران 2 به‌عنوان خوراک راکتور RBC استفاده کردند. نتایج مطالعات بر روی سیستم گویای راندمان حذف ماکزیمم مطلوب 95٪ شاخص آلایندگی COD و 91٪ حذف جامدات معلق با غلظت متوسط COD 620 mg/l ورودی به سیستم در دوره راه‌اندازی اولیه و راندمان قابل قبول حدود 90٪

را به سیستم تلقیح کردند و مدت زمان ۳ هفته برای تشکیل بیوفیلم بر روی دیسک‌ها طول کشید. آن‌ها در این تحقیق به حذف کامل پیریدین و بنزن، حذف ۹۶-۸۵٪ فنول و نفتالن، حذف ۹۲/۶-۶۳٪ COD دست پیدا کردند.

در طول اجراهای دوگانه با غلظت‌های ورودی COD، ۱۱۲۰ mg/l و ۲۲۰۰ mg/l در این سیستم بوده است. Jeswani and Mukherji (2012) تجزیه ترکیبات فنولی و هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک در یک پساب سنتتیکی با میانگین COD=۱۳۸۸ mg/l در یک RBC مطالعه کردند. آن‌ها لجن فعال

جدول ۱- جزئیات تجهیزات و داده‌های آزمایشگاهی RBC در پژوهش‌های پیشین

مرجع	HRT (h)	Ω (%)	ω (rpm)	T (°C)	دیسک	راکتور	مراحل	جریان	مقیاس
Choung et al. (1988)	-	-	۲۰	۲۵	-	آکرلیک	۴	پیوسته	آزمایشگاهی
Tokuz (1989)	۲ ۳	-	۴	-	HDPE d=۵۰ cm	$A_T=۲۳/۲$ m ² $V_T=۱۴۰$ lit	۴	پیوسته	پیلوت
Tyagi et al. (1993)	۷/۶ ۳/۸ ۲/۵۳ ۱/۸۹	۴۲/۵	۱۰	-	PUF d=۲۵ cm No=۱۲ space=۲ cm	پلکسی گلاس $A_T=۰/۴۹$ m ² $V_W=۶/۲$ lit	۴	ناپیوسته	آزمایشگاهی
Banerjee (1997)	-	-	۱ ۲۴	۲۰/۵ ۲۷	PS d=۴۱ cm No=۶۰	آلومینیوم Thk=۵ mm $A_T=۱/۹۸$ m ²	۴	پیوسته	بنچ
Radwan and Ramanujam (1997)	-	۴۰	۱۲	-	Nechlon No= ۳۲	پرسپکس گلاس $A_T= ۴/۶۷$ m ²	۴	پیوسته	آزمایشگاهی
Israni et al. (2002)	-	۵۰	۴۰ ۱۷۵	۲۰ ۳۰	Thk=۲ mm No=۹	استیل $V_W=۰/۵$ dm ³	۱	پیوسته	بنچ
Alemzadeh et al. (2002)	-	-	۱۵	۱۳ ۲۳	پلکسی گلاس Thk=۳ mm d=۲۱ cm No=۷۲	پلکسی گلاس Thk=۵ mm $A_T=۱/۵$ m ² $V_T=۷/۵$ lit	۳	پیوسته	بنچ
Melo et al. (2005)	-	-	۸۰	-	استیل d=۹ cm No=۹	شیشه $V_T=۷/۵$ lit $V_W=۳$ lit	۱	ناپیوسته	بنچ
Pradeep et al. (2011)	۲۴ ۲۸ ۳۶	۳۰ ۳۵ ۴۰	۵۰ ۷۵ ۱۰۰	۲۷ ۳۲	PMMA d=۱۸ cm No=۶	شیشه Thk=۵ mm $V_W=۱۰$ lit	۱	ناپیوسته	آزمایشگاهی
Duque et al. (2011)	۱۸/۶	۴۰	۱۲	-	PVC Thk=۳ mm d=۱۶/۵ cm	$V_T=۱۰$ lit	۵	پیوسته	آزمایشگاهی
Khalil Ariya et al. (2012)	-	۴۰	۲/۵ ۱۲/۵	۲۰ ۲۴	پلکسی گلاس d=۱۵ cm No= ۵۴	پلکسی گلاس $A_T=۱۲$ m ² $V_W=۳$ lit	۲	ناپیوسته	آزمایشگاهی
Mirkhalili and Mirbagheri (2012)	-	۴۰	۱۰	-	پلکسی گلاس Thk=۱ cm d=۲۵ cm No= ۱۲	$A_T=۰/۳۹$ m ² $V_W=۱۲/۵$ lit	۳	پیوسته	پیلوت
Jeswani and Mukherji (2012)	۱۲ ۲۴ ۳۶ ۴۸	۳۵	۱۰	-	d=۱۴ cm No=۲۷ $A_T= ۰/۸۳$ m ²	$V_W=۴$ lit	۳	ناپیوسته	آزمایشگاهی

DO مورد نیاز از طریق چرخش دیسک‌ها، سادگی و سهولت در اجرا و بهره‌برداری و راندمان بالا (۹۹-۸۵٪) می‌توان از این سیستم به‌عنوان جایگزینی برای فرآیند لجن فعال رایج و سیستم‌های گران و پیچیده استفاده کرد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که راکتور RBC در صورت راهبری مناسب قابلیت حذف فنول در غلظت‌های مختلف با کارایی نسبتاً مطلوب را دارد و این سیستم می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای اثربخش در تصفیه فاضلاب‌های با بار آلی خیلی بالا در نظر گرفته شود. در پایان پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی به‌منظور کاهش زمان موردنیاز برای تشکیل بیوفیلم و سازگاری سیستم با غلظت‌های بالا و همچنین کاهش حجم لجن تولیدی از باکتری‌های بومی (باکتری‌های مقاوم به فنول موجود در فاضلاب صنعتی موردنظر) استفاده شود.

۷- علائم اختصاری

AOPs: Advanced Oxidation Process
 ASS: Activated Sludge System
 BOD₅: Biochemical Oxygen Demand
 COD: Chemical Oxygen Demand
 DAF: Dissolved Air Flotation
 DO: Dissolved Oxygen
 FBB: Fluidized Bed Bioreactor
 HLR: Hydraulic Loading Rate
 HRT: Hydraulic Retention Time
 OLR: Organic Loading Rate
 PAHs: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon
 RBC: Rotating Biological Contactor
 TF: Tricking Filter
 USEPA: United States Environmental Protection Agency
 WHO: World Health Organization

۸- مراجع

Ahmad, S.A., Syed, M.A., Arif, N.M., Abdul Shukor, M.Y., and Shamaan, N.A., (2011), "Isolation, identification and characterization of elevated phenol degrading Acinetobacter sp. Strain AQ5NOL 1", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(8), 1035-1045.
 Akbal, F., and Nur Onar, A., (2003), "Photocatalytic degradation of phenol", *Environmental Monitoring and Assessment*, 83(3), 295-302.
 Alemzadeh, I., Vossoughi, M., and Houshmandi, M., (2002), "Phenol biodegradation by rotating biological contactor", *Biochemical Engineering Journal*, 11(1), 19-23.
 Banerjee, G., (1997), "Treatment of phenolic wastewater in RBC reactor", *Water Research*, 31(4), 705-714.
 Bitton, G., (2005), *Wastewater microbiology*, John Wiley & Sons Inc Publication, 3rd Ed.
 Bodalo, A., Hidalgo, A.M., Gomez, E., Lopez, I., Gomez, M., and Murcia, M.D., (2009), "Nanofiltration membranes to reduce phenol concentration in wastewater", *Desalination*, 245(1-3), 307-313.

مطالب ارائه شده در این مطالعه، تلاش‌های صورت گرفته برای تصفیه پساب حاوی فنول توسط سیستم RBC را شامل می‌شود. با بررسی پژوهش‌های صورت گرفته می‌توان به‌موارد زیر پی برد:

- برای تشکیل یک بیوفیلم (طلائی-قهوه ای رنگ) به ضخامت معمول (۱-۴ mm) بر روی دیسک‌ها مدت زمان تقریبی یک هفته تا یک ماه نیاز است؛
- افزایش سطح دیسک‌ها سبب بهبود بازده حذف می‌شود اما در راکتورهای دارای تماس دهنده‌های با اندازه سطح بزرگتر، سرعت افزایش بازده حذف آلاینده کاهش می‌یابد؛
- افزایش راندمان حذف آلاینده در انتهای مرحله دوم نسبت به حالت تک‌مرحله‌ای قابل‌ملاحظه بوده، اما اضافه کردن مرحله سوم تاثیر چشمگیری بر روی بازده حذف فنول نداشته است؛
- تجزیه بیولوژیکی فنول توسط باکتری‌ها (عمدتاً باسیلوس و پسودوموناس) یک واکنش مرتبه اول در نظر گرفته می‌شود؛
- نقش فرآیند جذب سطحی و تبخیر در حذف فنول توسط راکتور RBC تنها در حدود ۱۰٪ است.
- افزایش نرخ بار آلی باعث افزایش ضخامت لایه بیولوژیکی و بهبود در عملکرد سیستم شده اما از طرفی موجب تقلیل اکسیژن محلول می‌شود؛
- افزایش جریان ورودی موجب افزایش نرخ بار هیدرولیکی می‌شود که به‌دنبال آن کاهش زمان اقامت را به‌همراه دارد و سبب کاهش در نرخ حذف فنول می‌شود؛
- افزایش دما موجب افزایش سرعت فرآیند بیولوژیکی شده و در محدوده دمایی °C ۲۰-۳۶ بیشترین تاثیر دما در افزایش بازده حذف فنول مشاهده می‌شود؛
- متناسب با افزایش سرعت چرخش دیسک‌ها، اکسیژن محلول و ضریب انتقال جرم اکسیژن افزایش یافته و زمان اقامت هیدرولیکی کاهش می‌یابد که در نتیجه آن بازده حذف فنول افزایش می‌یابد. اما در سرعت‌های بالا امکان گیر افتادن در لجن و کنده شدن لایه بیومس وجود دارد. از همین رو محدوده سرعت ۱۰-۱۲ rpm به‌عنوان حالت بهینه گزارش شده است؛
- استغراق جزئی یا کلی برای راکتور RBC هواری استفاده می‌شود (۳۰-۵۰٪) و استغراق بیش از ۵۰٪ به‌دلیل فرو رفتن شافت درون پساب عملی نیست. با افزایش استغراق، زمان اقامت هیدرولیکی کاهش می‌یابد و انتخاب میزان ۴۰-۴۲٪ در استغراق امری رایج است.

با توجه به ویژگی‌های خوب این سیستم نظیر تحمل شوک‌های هیدرولیکی و آلی، عدم‌نیاز به هوادهی خارجی و تامین

- municipalwastewater Comparison between membrane bioreactor and conventional activated sludge treatment", *Chemosphere*, 67(2), 335-343.
- Hamdy, M.K., Sherrer, E.L., Randies, C.I., Weiser, H.H., and Sheets, W.D., (1956), "Some characteristics of a phenol-oxidizing pseudomonas", *Journal of Applied Microbiology*, 4(2), 71-75.
- Harlow, I.F., Powers, T.J., and Ehlers, B.B., (1938), "The phenolic waste treatment of the Dow chemical Co", *Sewage Works Journal*, 10(6), 1043-1059.
- Hsien, T-Y., and Lin Y-H., (2005), "Biodegradation of phenolic wastewater in a fixed biofilm reactor", *Biochemical Engineering Journal*, 27(2), 95-103.
- Iliev, V., Mihaylova, A., and Bilyarska, L., (2002), "Photooxidation of phenols in aqueous solution, catalyzed by mononuclear and polynuclear metal phthalocyanine complexes", *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 184(1-2), 121-130.
- Israni, S.H., Koli, S.S., Patwardhan, A.W., Melo, J.S., and D'souza, S.F., (2002), "Phenol degradation in rotating biological contactors", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77(9), 1050-105.
- Jeswani, H., and Mukherji, S., (2012), "Degradation of phenolics, nitrogen-heterocyclics and polynuclear aromatic hydrocarbons in a rotating biological contactor", *Bioresource Technology*, 111, 12-20.
- Kehma, H., and Reed, G., (2003), *Biotechnology*, Wiley-Vch, Weinheim, Germany, 2nd Ed.
- Kinsley, C., and Nicell, J.A., (2000), "Treatment of aqueous phenol with soybean peroxidase in the presence of polyethylene glycol", *Bioresource Technology*, 73(2), 139-146.
- Khalil Ariya, F., Ayati, B., and Ganjidoost, H., (2012), "Comparison of current RBC and biodrum systems in Hydroquinone wastewater treatment", *Modares Civil Engineering journal*, 12(3), 11-19.
- Leslie Grady, C.P., Daigger, G.T., and Lim, H.C., (1999), *Biological wastewater treatment*, Marcel Dekker Inc., New York, 2nd Ed.
- Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Stensel, H.D., Tsuchihashi, R., and Burton, F.L., (2013), *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*, McGraw-Hill, 5th Ed.
- Melo, J.S., Kholi, S., Patwardhan, A.W., and D'Souza, S.F., (2005), "Effect of oxygen transfer limitations in phenol biodegradation", *Process Biochemistry*, 40(2), 625-628.
- Mirkhalili, H., and Mirbagheri, A., (2012), "Refinery wastewater treatment by rotating biological contactors (RBC reactor)", 2nd National Conference on Health, Environment and Sustainable Development, Bandar Abbas, Iran.
- Molin, G., and Nilsson, I., (1985) "Degradation of phenol by pseudomonas putida ATCC 11172 continuous culture at different ratios of biofilm surfaces to culture volume", *Applied and Environmental Microbiology*, 50(4), 946-950.
- Murray, C.A., and Parsons, S.A., (2004), "Advanced oxidation processes: Flowsheet options for bulk natural organic matter removal", *Water Science and Technology: Water Supply*, 4(4), 113-119.
- Najafpour, G.D., Zinatizadeh, A.A.L., and Lee, L.K., (2006), "Performance of a three-stage aerobic RBC reactor in food canning wastewater treatment", *Biochemical Engineering Journal*, 30(3), 297-302.
- Bracewell, L.W., Jenkins, D., and Cameron, W., (1980), "Treatment of phenol formaldehyde resin wastewater using rotating biological contactor", 1st National Symposium Workshop on RBC Technology, Champion, Pennsylvania, USA.
- Cassidy, D.P., Efendiev, S., and White, D.M., (2000), "A comparison of CSTR and SBR bioslurry reactor performance", *Water Research*, 34(18), 4333-4342.
- Chan, R., and Stenstrom, M., (1981), "Use of the rotating biological contactor for appropriate technology wastewater treatment", Research Leaflet Series, University of California.
- Chan, Y.J., Chong, M.F., and Law, C.L., (2010), "Biological treatment of anaerobically digested palm oil mill effluent (POME) using a lab-scale sequencing batch Reactor (SBR)", *Journal of Environmental Management*, 91(8), 1738-1746.
- Chavan, A., and Mukherji, S., (2002), "Treatment of hydrocarbon-rich wastewater using oil degrading bacteria and phototrophic microorganisms in rotating biological contactor: Effect of N: P ratio", *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3), 63-72.
- Choung, Y.K., Bae, B.H., and Ahn, K.H., (1988), "Treatment of phenolic wastewater using rotating biological contactors", *Advances in Water Pollution Control in Asia Pergamon Press Oxford*, Bangkok, Thailand.
- Christian, R.A., (2013), *Wastewater treatment: Concepts and design approach*, PHI Learning Pvt Ltd. 2nd Ed.
- Culp, G.L., and Heim, N.F., (1978), "Field manual for performance evaluation and troubleshooting at municipal wastewater treatment facilities", US Environmental Protection Agency Office of Water, Washington D.C., USA.
- Dabrowski, A., Podkoscielny, P., Hubichi, Z., and Barczdak, M., (2005), "Adsorption of phenolic compounds by activated carbon: A critical review", *Chemosphere*, 58(8), 1049-1070.
- Department for Environment, Food and Rural Affairs and the Environment Agency (DEFRA-EA), (2002), "Collation of toxicological data and intake values for humans", Environment Agency, Bristol, UK.
- Dold, P.L., (1989), "Current practice for treatment of petroleum refinery wastewater and toxics removal", *Water Pollution Research Journal of Canada*, 24(3), 363-390.
- Doman, J., (2008), "Results of operation of experiment contact filter with partially submerged plates", *Sewage Works Journal*, 1(5), 555-560.
- Duque, A.F., Bessa, V.S., Carvalho, M.F., and Castro, P.M., (2011), "Bioaugmentation of a rotating biological contactor for degradation of 2-fluorophenol", *Bioresource Technology*, 102(19), 9300-9303.
- Ebrahimi, A., Asadi, M., and Najafpour, G.D., (2009), "Dairy wastewater treatment using three-stage rotating biological contactor (NRBC)", *International Journal Engineering Transactions B: Applications*, 22(2), 107-114.
- Freeman, H., (2003), "Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal", McGraw-Hill, USA.
- Ganczarczyk, J.J., (1983), *Activated sludge process: Theory and practice*, Marcel Dekker Inc., New York.
- Gonzalez, S., Petrovic, M., and Barcelo, D., (2007), "Removal of a broad range of surfactants from

- Patterson, J.W., (2003), *Wastewater treatment technology*, Ann Arbor Science Publishers Inc., USA.
- Pradeep, N.V., Anupama, and Hampannavar, U.S., (2011), "Biodegradation of phenol using rotating biological contactor", *International Journal of Environmental Sciences*, 2(1), 105-113.
- Radwan, K.H., and Ramanujam, T K, (1997), "Studies on organic removal of 2, 4-dichlorophenol wastewaters using a modified RBC", *Bioprocess Engineering*, 16(4), 219-223.
- Rappoport, Z., (2003), *The chemistry of phenols*, John Wiley and Sons, Ltd., Canada.
- Rodgers M., and Zhan, X-M., (2003), "Moving-medium biofilm reactors", *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2(2-4), 213-224.
- Singh, N., and Singh, J., (2002), "An enzymatic method for removal of phenol from industrial effluent", *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 32(2), 127-133.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., and Stensel, H.D., (2003), *Wastewater engineering treatment and reuse*, McGraw-Hill, Inc., USA, 4th Ed.
- Tokuz, R.Y., (1989), "Biodegradation and removal of phenols in rotating biological contactors", *Water Science and Technology*, 21(12), 1751-1754.
- Tyagi, R.D., Tran, F.T., and Chowdhury, A.K.M.M., (1993), "Biodegradation of petroleum refinery wastewater in a modified rotating biological contactor with polyurethane foam attached to the disks", *Water Research*, 27(1), 91-99.
- Water Environment Federation (WEF), (1998), "Design of municipal wastewater treatment plants", WEF Manual of Practice No. 8 ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 76, 5th Ed.
- Wick, R., (2001), "Rotating biological contactors in operation of wastewater treatment plants", California State University, Sacramento Foundation.
- Yang, R.D., and Humphrey, A.E., (1975), "Dynamics and steady state studies of phenol biodegradation in pure and mixed cultures", *Biotechnology and Bioengineering*, 17(8), 1121-1235.