Available online @ www.jscw.icrc.ac.ir
نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۳ (۱۳۹۲) ۴۶-۳۷
Journal of Studies in Color World, 3 (1392)/ 37-46

مروری بر جذب بیولوژیکی رنگزاها به‌وسیله قارچ‌های غیر زنده

محمد ابراهیم علیا[۱]، رعنا خلیل نژاد[۲*]
۱- استادیار، گروه رنگ و محیط زیست، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵
۲- دکتری شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۹۱۳۶۷۴۷۱۱

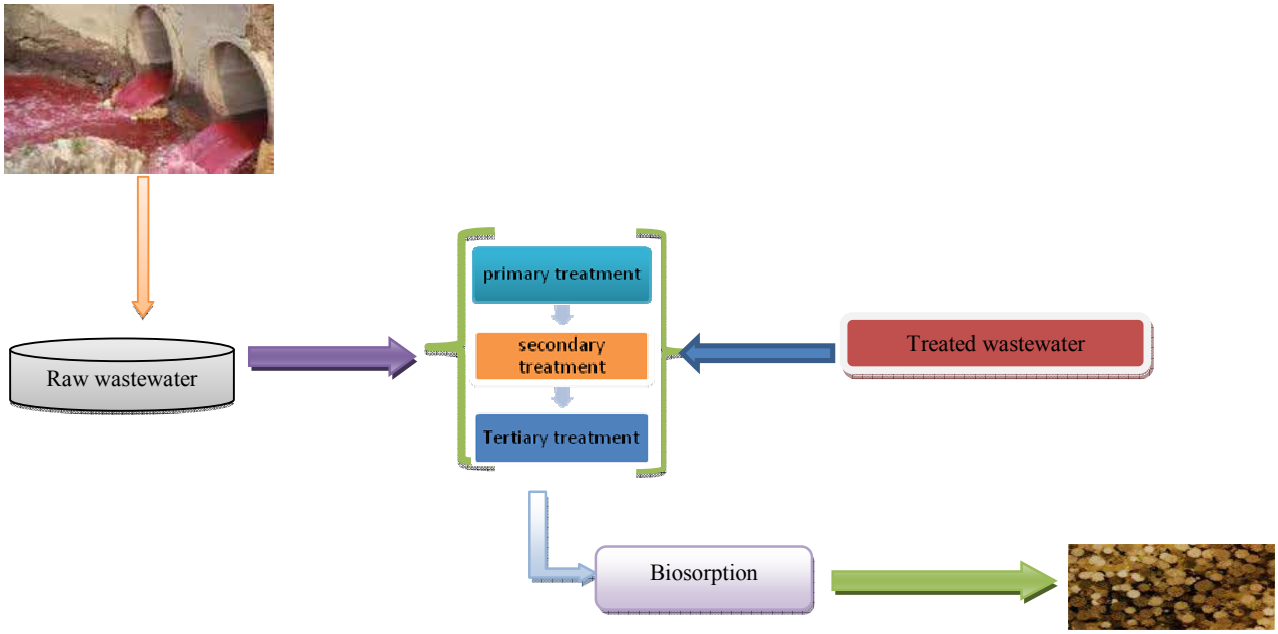
تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۲۱ تاریخ بازبینی ۱: ۹۲/۴/۴ تاریخ بازبینی ۲: ۹۲/۷/۲۸ تاریخ بازبینی ۳: ۹۲/۹/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۹

چکیده

در حال حاضر آلودگی محیط زیست به عنوان یک مشکل و معضل جهانی مطرح می‌باشد. رنگزاها ازجمله خطرناک‌ترین گروه‌های ترکیبات شیمیایی یافت شده در پساب‌های صنعتی بوده است. در این مقاله مروری حذف رنگزاها با استفاده از قارچها مورد مطالعه قرار گرفته است. قارچها به صورت غیر زنده جذب بهتری را نسبت به نوع زنده دارد، جوشاندن بیومس در سود یکی از روش‌های مناسب برای کشتن قارچ مورد نظر می‌باشد. این قارچهای غیر زنده از طریق سازوکار جذب بیولوژیکی این آلاینده‌ها را از پساب‌های مختلف حذف می‌کنند. عواملی مانند دما، غلظت جاذب، pH در جذب بیولوژیکی موثر است. چند نمونه از رنگزاهایی که توسط قارچها جذب می‌شوند بررسی گردیده و در ادامه برای بهینه‌کردن جذب بیولوژیکی از روش تثبیت سلولی استفاده گردیده است. در فرآیند جذب بیولوژیکی رنگزاها در سیستم ناپیوسته از مدل‌های ایزوترمی که بیانگر ارتباط تعادلی غلظت ماده جذب شونده بین جاذب و محلول می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد و مطالعات مدل‌های سنتیکی بیوجذب این رنگزاها بررسی شد. همچنین معادلات توماس و یان که در سیستم پیوسته کاربرد دارند مورد بحث واقع شده‌اند.

واژه‌های کلیدی

میکروارگانیسم‌ها، قارچ، رنگزاها، جذب بیولوژیکی، تثبیت سلولی، سدیم آلژینات، سیستم پیوسته، ایزوترم.



*Corresponding author: rana_khalilnezhad@yahoo.com
Review on biosorption of dyes by non-living fungi, M. E. Olya, R. Khalilnezhad

۱- مقدمه

در دو دهه گذشته کارهای قابل توجهی با هدف استفاده از میکروارگانیسم‌ها به عنوان عوامل پاک‌کننده آلودگی‌های محیطی حاصل از پساب‌های رنگی کارخانجات تولید کننده این آلاینده‌ها انجام گرفته است که این فرآیندها، فرآیندهای بیولوژیکی می‌باشند که ارزان‌تر بوده و قابلیت اجرایی ساده‌تری دارد و نسبت به سایر روش‌ها در اولویت قرار گرفته است. فرآیندهای بیولوژیکی به لحاظ هزینه کم، طراحی آسان، سهولت در امر بهره برداری و عدم حساسیت نسبت به مواد سمی، امروزه مناسب‌ترین روش در حذف آلاینده‌های رنگی و بهبود کیفیت فاضلاب صنایع به منظور استفاده مجدد، به شمار می‌رود [۱]. مهم‌ترین مزیت این روش استفاده بسیار کمی از جاذب در جذب غلظت‌های بالای رنگزا، استفاده مجدد از جاذب و عدم تولید لجن می‌باشد [۲]. جاذب‌های بیولوژیکی می‌توانند به صورت‌های غیر زنده[1] و زنده[2] مورد استفاده قرار گیرند. اگر سیستم جذب جاذب بیولوژیکی غیر زنده باشد، فرآیندهای حذف آلاینده سریع بوده و مستقل از چرخه متابولیک بیولوژیک انجام شده که به آن سیستم غیرفعال[3] گفته می‌شود و اگر جاذب بیولوژیکی زنده باشد فرآیند مورد نظر به کندی انجام شده و به آن سیستم فعال[4] اطلاق می‌گردد [۳]. در فرآیند غیرفعال، آلاینده‌ها به مکان‌های موجود در دیواره سلولی جاذب‌ها متصل می‌شوند و حال آنکه در فرآیند فعال با توجه به چرخه متابولیک سلولی، از دیواره سلول عبور کرده و وارد سلول می‌شود [۴]. قابل ذکر است که اگر جاذب بیولوژیکی یک گیاه آبزی زنده باشد، کاربرد واژه گیاه پالایی[5] بر جذب بیولوژیکی[6] ارجحیت دارد. استفاده از میکروارگانیسم‌هایی مثل جلبک‌ها، قارچ‌ها، باکتری‌ها، مخمرها و اکتینومیست‌ها[7] به عنوان جاذب رنگ‌ها مورد استفاده توسط محققان قرار گرفته‌اند. کوچک بودن اندازه ذرات، سرعت در رشد و تکثیر، چگالی کم، قدرت جداسازی بالا و کم هزینه بودن استفاده از آنها باعث شده تا محققان توجه بیشتری را به جاذب‌های بیولوژیکی داشته باشند [۵]. در بین میکروارگانیسم‌ها قارچ‌ها قدرت جذب بیشتری را نسبت به برخی گونه‌های دیگر میکروارگانیسم دارند. قارچ‌ها بسته به نوع رنگزا در pHهای قلیایی جذب بهتری از خود نشان می‌دهند زیرا دیواره سلولی آنها شامل کربوکسیلات و فسفات است [۶]. در ضمن با مطالعات انجام شده مشخص شده است که بیوماس‌های[8] غیر زنده قابلیت استفاده جهت حذف غلظت بالاتری از آلاینده‌ها (در حد ۵۰ تا ۵۰۰ میلی گرم در لیتر) را در مقایسه با انواع زنده خود دارند، ضمن اینکه کنترل عوامل فرآیند حذف بوسیله انواع غیر زنده آسانتر می‌باشد [۷].

[1] Non-living or dead
[2] Living
[3] Passive uptake
[4] Active uptake
[5] Phytoremediation
[6] Biosorption
[7] Actinomycetes
[8] Biomass

۲- بررسی خصوصیات میکروارگانیسم‌های قارچی در جذب بیولوژیکی رنگزاها

تاکنون قارچ‌ها و باکتری‌های کثیری که برای حذف و جذب رنگزاها استفاده شده که به عنوان مثال از پنی‌سیلیوم YW 01 برای جذب اسید سیاه ۱۷۲ و قرمز کنگو [۶]، ساکارومیسس سرویزیه[9] و ریزپاس نیگریکان‌ها[10] برای جذب رنگزاهای راکتیو گزارش شده است [۸].

۲-۱- خصوصیات عمومی قارچ‌ها

قارچ‌ها گیاهانی هستند بدون سبزینه بی ریشه و فاقد ساقه و برگ و گل و در رده‌بندی جزو ریسه‌داران[11] به شمار می‌آیند. مواد غذایی در قارچ‌ها به صورت گلیکوژن و چربی است و چون دارای هسته مشخص، حقیقی، کلروفرم و میتوکندری هستند. قارچ‌ها موجوداتی هستند فاقد کلروفیل که به‌وسیله اسپر تکثیر می‌یابند. سلول آنها واجد هسته و به طریقه جنسی و غیر جنسی تولید مثل می‌نمایند در دیواره آنها ماده سلولز یا کیتین و یا هر دو یافت می‌شود [۹]. عمده‌ترین ترکیب غشاء پلاسمایی قارچ‌ها استرول‌ها می‌باشدکه مهم‌ترین استرول موجود در غشاء پلاسمایی قارچ‌ها، ارگوسترول می‌باشد. ارگوسترول محل اثر بسیاری از داروهای ضدقارچی مثل پلی انها[12] و آزول‌ها[13] می‌باشد. قارچ‌ها از نظر تغذیه چون کلروفیل وکلروپلاست ندارند هتروتروف بوده و برای رشد و تکثیر به ترکیبات آلی جهت اخذ انرژی و کربن نیاز دارند. قارچ‌ها از نظر تولید مثل همگی دارای تولید مثل غیرجنسی و تعدادی تولید مثل جنسی هم دارند.

۲-۲- ترکیبات موجود در قارچ‌ها

قارچ‌ها شامل ۸۰ تا ۹۰٪ آب، ۲ تا ۵٪ مواد پروتئینی، ۳٪ سلولز قارچی، ۴٪ ترهالوز، ۱٪ چربی، ۱/۲ تا ۱۱/۲ ٪ مواد معدنی و مقدار متغیری گلیکوژن می‌باشد. عناصری مانند فسفر، گوگرد، منیزیم، روی، آهن، سدیم، کلسیم، مس و کلر مورد نیاز است [۹].

۲-۳-ساختار رویشی قارچ‌ها

توده قارچی مجموعه ریسه‌های میکروسکوپی است که در همه جهات شاخه تولید می‌کند. ریسه قارچ ممکن است توسط دیواره‌های عرضی موسوم به سپتوم در فواصل معین منقطع گردد. ریسه بسیاری از قارچ‌های عالی دیواره عرضی دارند اکثر قارچ‌های پست دیواره عرضی ندارند. دیواره عرضی در تامین حمایت فیزیکی و در تمایز سلولی ریسه اهمیت دارد مهم‌ترین اندام رویشی در قارچ‌ها ریسه است که رشته لوله مانند بسیار نازک و منشعب که مملو از سیتوپلاسم یک یا چند هسته‌ای است. توده‌ای از این رشته‌های ظریف و منشعب مانند غنی به یکدیگر می‌تنند و میسیلیوم را که در واقع جسم قارچ است را بوجود می‌آورند [۹].

[9] Saccharomyces Cerevisiae
[10] Rhizopusnigricans
[11] Thallophytes
[12] Polyenes
[13] Azoles

۲-۴- pH مورد نیاز برای رشد قارچ‌ها

بهترین pH برای رشد قارچ‌ها pH=۷ می‌باشد. برخی از قارچ‌ها مانند مخمرها در pH=۲ هم می‌توانند زندگی کنند. قارچ‌ها همگی در رنگ‌آمیزی (گرم مثبت) بنفش یا آبی رنگ هستند. قارچ‌ها هوازی یا بی‌هوازی اختیاری هستند و در مقدار کم O_2 هم می‌توانند زندگی کنند. قارچ‌ها با آب و هوای متفاوت سازگاری دارند و در تمام شرایط آب و هوایی قادر به زندگی می‌باشند.

۲-۵- نحوه زندگی قارچ‌ها

۱- زندگی همزیستی[1]: زندگی مسالمت آمیز با دیگر موجودات مثل هم‌زیستی قارچ باجلبک و قارچ با غلات که منجر به جذب و تثبیت نیتروژن و مواد معدنی و آلی در گیاهان می‌گردد.

۲- زندگی هم‌سفرگی[2]: شکلی از هم‌زیستی که دو ارگانیسم به طوری در ارتباطند که یکی سود می‌برد و دیگری نه سود و نه ضرر مثل مخمرهای دستگاه گوارش.

۳- زندگی ساپروفیتی[3]: اکثر قارچ‌ها ساپروفیت هستند و در خاک و آب بسر برده و مواد غذایی خود را از مواد آلی که روی آن زندگی می‌کنند به‌دست می‌آورند.

۴- زندگی انگلی[4]: که در خارج یا داخل بدن میزبان می‌توانند زندگی کنند در نتیجه ممکن است موجب بیماری شوند [۹, ۱۰].

۳- سازوکار جذب بیولوژیکی

برای تهیه جاذب‌های بیولوژیکی غیر زنده (قارچ‌های غیر زنده)، ابتدا به جمع‌آوری و یا تولید انواع زنده آنها مبادرت می‌شود. برخی از انواع جاذب‌ها بیولوژیکی نظیر گونه‌هایی جلبک‌ها، سرخس‌ها و غیره را می‌توان به‌صورت زنده از طبیعت تهیه نمود و برخی دیگر نظیر گونه‌هایی از باکتری‌ها، مخمرها و میکروارگانیسم‌ها را می‌توان همانند قارچ‌ها در شرایط آزمایشگاهی کشت داد. بار روش‌هایی مانند جوشاندن در سود، فرمالدئید و اسید و اتوکلاو کردن جاذب زنده به غیر زنده تبدیل می‌گردد، در ادامه این بیوماس‌ها خشک و آسیاب می‌شوند و بدین صورت جاذب غیر زنده خام بوجود می‌آید [۱۱]. جاذب‌های بیولوژیکی غیر زنده بر طبق قوانین جذب فیزیکی (مانند لانگمویر و فرندلیچ) به حذف رنگزاها می‌پردازند و همان‌طوری که ذکر شد فرآیند حذف آنها سریع (طی چند دقیقه) و مستقل از چرخه متابولیک سلولی می‌باشد. به‌عبارتی رنگزاها به دیواره سلول‌های مرده جاذب متصل می‌شوند که سرعت، شدت و ظرفیت این اتصال، اصولاً به نوع جاذب بیولوژیکی، بار جاذب و رنگزا و گروه‌های عاملی موجود در سطح جاذب بستگی دارد. به عنوان مثال کورینوباکتریوم گلوتامیکوم[5] که متعلق به گروه آکتینومیست‌ها می‌باشد و به‌طور وسیع برای تولید اسیدهای آمینه به‌کار می‌رود در مطالعاتی برای جذب بیولوژیکی رنگزاهای راکتیو به کار رفته است. دیواره سلولی ک. گلوتامیکوم[6] شامل گروه‌هایی مانند کربوکسیل، فسفونات و آمین می‌باشد این گروه‌های فعال به خصوص گروهای آمین در سطح توده سلولی یا جاذب بیولوژیکی توانایی اتصال به انواع مختلف رنگزاهای راکتیو را دارند [۵, ۱۲] فرآیند جداسازی میکروبی در سلول‌ها در ۴ ناحیه از سلول اتفاق می‌افتد که عبارتند از: جذب از طریق تجمع در سطح سلول، جذب بر روی دیواره سلول، جذب در غشاء سلول، جذب درون سلولی و متداول‌ترین نوع جذب میکروبی جذب سطحی بیولوژیکی است و زمانی اتفاق می‌افتد که اتم‌ها یا مولکول‌ها یک فاز به طور یکنواخت بر روی فاز دیگر رسوب نمایند [۱۳].

این نوع جذب به دو شکل جذب فیزیکی و شیمیایی صورت می‌پذیرد.

۳-۱- جذب فیزیکی

در این حالت مولکول‌های جذب شده می‌توانند در فصل مشترک بین دو فاز حرکت کنند. به آن جذب ایده‌ال نیز می‌گویند و این جذب به کمک نیروی واندروالس[7] می‌باشد.

[1] Symbiosis
[2] Commensalism
[3] Saprophytic
[4] Parasitic

[5] Corynebacterium Glutamicum
[6] C.glutamicum
[7] Van der waals

شکل ۱- تصاویر قارچ پنی سیلیوم.

۳-۲- جذب شیمیایی

جذب شیمیایی که جذب فعال نیز نامیده می‌شود مثل اکسیداسیون - احیاء، عمدتاً تعیین اینکه جذب در هر منفذ از سلول به وسیله کدام نوع جذب صورت می‌پذیرد، به‌سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد و ممکن است شامل هر سه نوع جذب فوق باشد ولی آنچه که مشخص است اینکه در سه حالت، جذب از طریق تجمع در سطح سلول، جذب بر روی دیواره سلول و همچنین جذب در غشاء سلول، جذب به صورت برگشت‌پذیر بوده و بازیابی آن امکان‌پذیر می‌باشد.

اما جذب درون سلولی برگشت ناپذیر بوده و بازیابی آن امکان‌پذیر نیست. این نوع سازوکار معمولاً زمانی‌که سمیت آلاینده‌ها خیلی بالا باشد رخ می‌دهد که این ناشی از افزایش نفوذپذیری آلاینده‌ها در غشاء و همچنین به‌واسطه فعل و انفعالاتی که در اثر سمیت آلاینده رخ می‌دهد، می‌باشد. این نوع جذب به آهستگی صورت می‌پذیرد در حالی‌که در جذب برگشت‌پذیر سرعت جذب نسبتاً بالاست. سازوکار اتصال به دیواره سلولی و اتصال بیرون سلولی در سلول‌های غیر زنده و در حالی‌که سازوکار جذب درون سلولی فقط در سلول‌های زنده مشاهده شده است [۱۳]. در طراحی فرآیند جذب سطحی تعیین مرحله محدودکننده جذب یکی از مهم‌ترین عوامل است. معمولاً در جذب یک آلاینده بر روی جاذب چهار مرحله اتفاق می‌افتد: نفوذ توده‌ای، نفوذ لایه‌ای، جذب بر روی سطح جاذب و نفوذ بین ذره‌ای. معمولاً سه مرحله اول به عنوان مرحله نفوذ خارجی نامیده می‌شوند. نفوذ توده‌ای و جذب بروی سطح جاذب بسیار سریع اتفاق می‌افتد و از این رو مرحله تعیین کننده در جذب سطحی نیستند. بنابراین لازم است که برای مشخص کردن سازوکار جذب آلاینده بر روی جاذب از مدل نفوذ بین ذره‌ای استفاده گردد. معادله ۱ نفوذ بین ذره‌ای را نشان می‌دهد:

$$q_t = k_i t^{0.5} + c \qquad (۱)$$

در این رابطه، k_i نشان دهنده ثابت سرعت نفوذ بین ذره‌ای و ضف نشان‌دهنده مقدار غلظت رنگ در حالت تعادل در زمان‌های مختلف می‌باشد. k_i از رسم مقدار q_t در مقابل $t^{0.5}$ به‌دست می‌آید. اگر این منحنی از مرکز نمودار عبور کند مدل نفوذ بین ذره‌ای مرحله تعیین‌کننده سرعت است [۱۴].

۴- عوامل موثر در جذب بیولوژیکی

بررسی میزان کارایی روش جذب بیولوژیکی از جمله عوامل اساسی در استفاده صنعتی آن می‌باشد از این رو باید به مطالعه مهم‌ترین عوامل در جذب بیولوژیکی که در طراحی تجهیزات صنعتی ضروری ان پرداخت:

۱- تغییرات دما: در محدوده ۲۰ الی ۳۰ °C تغییرات زیادی در بازدهی واکنش ایجاد نمی‌کند

۲- pH: از جمله اساسی‌ترین عوامل در جذب بیولوژیکی می‌باشد زیرا ساختار شیمیایی محلول را تحت تاثیر قرار می‌دهد و باعث فعال شدن گروه‌های عاملی در سطح می‌شود.

۳- غلظت بیومس: از جمله عوامل اساسی در جذب می‌باشد. در غلظت‌های پایین بیومس میزان جذب بالایی مشاهده شده، ولی افزایش میزان بیومس باعث واکنش بین گروه‌های فعال بر روی سطح سلول می‌شود.

۴- مساحت سطح: خصوصیات فیزیکی در انتخاب مواد جاذب بسیار مهم هستند. یکی از خصوصیات قابل توجه در انتخاب جاذب، مساحت سطح مواد است. جاذبی که برای تصفیه پساب مورد استفاده قرار می‌گیرند. دارای تخلخل زیاد هستند. بزرگی مساحت سطح جاذب به ساختار تخلخل آن بستگی دارد. از خواص دیگر مساحت سطح که بر جذب سطحی تاثیر گذارند توزیع اندازه قطر ذرات می‌باشد. معیار اندازه‌گیری مساحت سطح در یک واحد حجم جاذب توسط روش (BET)[1] انجام شده است [۱۵, ۱۶]

۵- بهینه‌سازی روش جذب بیولوژیکی

برای بهتر شدن روش‌های جذب بیولوژیکی می‌توان از روش تثبیت در بستر هم‌چنین استفاده از سیستم پیوسته (ستون) استفاده نمود.

با یک دید کلی از جاذب‌های میکروبی و پساب‌های زیستی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به علت اینکه آنها دارای قابلیت پیوند شدن با گروه‌های عاملی در رنگزاها را دارا هستند می‌توانند به صورت تکراری مورد استفاده قرار گیرند. ضرورتاً نیاز اصلی یک سیستم جذب‌کننده صنعتی این است که جاذب بتواند به صورت یک بستر ثابت شده یا گسترش یافته مورد استفاده قرار گیرد و فشار زیادی را در بستر ایجاد نکند که مستلزم درجه‌ای از پیشتیمار، اندازه‌بندی، تغییرات شیمیایی یا تثبیت‌کردن می‌باشد این مسئله برای به‌دست آوردن یک ساختار مناسب جهت استفاده در راکتورهای بستر مورد هدف قرار گرفته و ممکن است جایگاه‌های اتصال ویژه رنگزاها را زیاد کند [۱۷]. به منظور حفظ قابلیت جذب رنگزاها توسط بیومس‌ها در طی فرآیندهای پیوسته صنعتی استفاده از یک روش تثبیت‌کننده اقتصادی مهم است. سلول‌های آزاد می‌توانند اطلاعات با ارزشی را در آزمایشات آزمایشگاهی ارائه دهند اما برای ایجاد ستون فشرده در کاربردهای صنعتی مناسب نیستند سلول‌های آزاد معمولا دارای قدرت و نیروی مکانیکی کم و اندازه کوچک می‌باشد و فشار هیدروستاتیک زیادی برای تولید میزان جریان مناسب نیاز دارند فشارهای بالا می‌تواند باعث تجزیه بیومس شود این مشکلات می‌تواند به وسیله استفاده از سیستم‌های سلولی تثبیت‌کننده برطرف شود.

بیومس تثبیت‌شده دارای مزایای بسیاری نظیر قابلیت استفاده مجدد بهتر، بارگیری بیشتر بیومس و کاهش انسداد در سیستم‌های جاری پیوسته می‌باشد [۱۸].

[1] Brunauer- Emmett- Teller

۶- روش‌های تثبیت سلولی[1]

برای تثبیت سلولی، روش‌های فراوانی ایجاد شده است. بسیاری از آنها مستقیماً از روش آنزیم‌های بی‌حرکت استفاده می‌کنند. انتخاب روش مناسب بستگی به وضعیت فیزیولوژیکی سلول دارد.

روش‌های فعالی که پذیرفته شده‌اند و می‌توانند در هر موقعیت فیزیولوژیکی مورد استفاده قرار گیرند و آسان‌تر و ارزان‌تر عمل می‌کنند به شرح زیر است.

۱) روش چسباندن

۲) روش تله‌گذاری[2]

۳) روش محدودکردن سلول‌ها

۴) روش اجتماع سلولی

روش مورد استفاده در این تحقیق روش تله‌گذاری می‌باشد که به مطالعه آن می‌پردازیم.

۶-۱- روش تله‌گذاری

تله‌گذاری یکی از روش‌هایی است که به‌وسیله آن می‌توان سلول‌ها را با انواع مواد خلل و فرجدار، در محل به دام انداخت. ساختمان‌های متخلخلی که در محل ایجاد می‌شوند می‌توانند برای تثبیت انواع سلول‌ها مورد استفاده قرار گیرند و این عمل به صورتی است که در بعضی از وضعیت‌ها، ذرات کمکی تشکیل شده ممکن است به سلول‌ها آسیب برساند. در این روش به سلول‌ها اجازه داده می‌شود وارد منافذ شوند و خروج آنها از منافذ بسیار مشکل خواهد بود. این امر می‌تواند بر روی اجسامی با سطوح میکروسکوپی مانند آجر، سرامیک، شیشه و هر جایی که اندازه منافذ از نظر ابعاد شبیه سلول‌ها است، انجام شود و یا بر روی سطوح ماکروسکوپی که دارای منافذ بزرگ هستند انجام پذیرد (بیش از ۰/۱ nm). این ذرات دارای ساختمان‌های گسترده بزرگی از مفتون فولادی ضد زنگ هستند که به صورت کره در می‌آیند و یا از اسفنج‌های مشبکی از جنس پلی یورتان هستندکه بصورت مکعب می‌باشد. تثبیت کردن این ذرات به اندازه توانایی سلول‌ها برای انعقاد و یا چسبیدن به لبه‌های مواد کمکی در داخل ساختمان بستگی دارد و باید در نظر داشت که تله قفسه‌ای به تله منفذی ارجحیت دارد [۸, ۱۷]. متداول‌ترین شکل ثبات سلولی، که حداقل در آزمایشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد، شامل تله‌های سلولی در داخل خلل و فرجی است که در اطراف سلول‌ها تشکیل می‌شود. سلول‌ها به شکل دوغاب یا مواد چسبی، عموماً با ترکیبی مخلوط می‌شوند که در نهایت به صورت ژل‌هایی در می‌آیند و تشکیل یک بستر متخلخل را می‌دهند. امروزه عمده روش‌های به‌کارگیری تله محلی، شامل استفاده از ژله‌های پلی ساکاریدی است که شامل: پاکاراجیمان[3]، آگار[4]، آلیژینات کلسیم[5]، پلی وینیل الکل[6]، پلی سولفون[7]، پلی ایزوپرن[8] می‌باشد [۸, ۱۹]. به دام انداختن سلول‌ها توسط آلیژینات کلسیم نمی‌تواند ساده باشد. سلول‌ها در محلول آلیژینات سدیم ریخته می‌شوند و سپس با محلولی از نمک کلسیم مخلوط می‌گردد. ایجاد ژل سطحی لحظه‌ای است اما حداقل ۲۰ دقیقه زمان جهت تشکیل کامل ژل آلیژینات صرف می‌شود. جهت این عملیات هیچ گرمایی مورد نیاز نیست و سلول‌های ثابت شده، فعالیت‌های خیلی زیادی را در خود ذخیره می‌نمایند. نقش آلیژینات کلسیم به‌عنوان یک وسیله ثابت کننده متوسط، بدین علت است که ژل‌ها می‌توانند در هنگام برخورد با فرآیندهایی که محتوی کیلات کننده‌های کلسیم هستند از بین بروند، مانند فسفات‌ها و این بدین معنی است که تولید دانه‌های آلیژینات کلسیم با ابعاد کمتر از ۵۰ دقیقه مشکل به‌نظر می‌رسد [۱۰, ۲۰].

۶-۲- سدیم آلیژینات

ترکیب شیمیایی سدیم آلیژینات، نمک سدیم بدست آمده از اسید آلژنیک[9] می‌باشد که فرمول شیمیایی آن $NaC_6H_7O_6$ می‌باشد. این ترکیب به حالت صمغی شکل می‌باشد و از دیواره سلولی جلبک‌های قهوه‌ای استخراج می‌شود و توسط کارخانه‌های مواد غذایی به منظور بالا بردن گرانروی و نیز به‌عنوان تعلیق‌کننده استفاده می‌شود. این پودر به رنگ زرد متمایل به قهوه‌ای و به حالت گرانول یا پودری شکل می‌باشد. این پودر به آهستگی در آب حل شده و به حالت محلول گرانرو در می‌آید [۲۰].

۶-۳- روش تثبیت سلول‌های قارچی در آلیژینات

۶ گرم آلژینات سدیم را در ۳۰۰ میلی لیتر آب مقطر ریخته شده برای حل‌کردن پودر آلیژینات سدیم مخلوط را بر روی گرم‌کن در دمای ۶۰ °C قرار داده تا پودر مذکور به طور کامل حل شود. پس از سردشدن محلول آلژینات ۶ گرم بیومس پودر شده را به محلول اضافه شد. پس از اختلاط کامل بیومس و محلول آلیژینات در قیف جداکننده ریخته شد و به صورت قطره قطره به محلول کلرید کلسیم ۰/۲ مولار بر روی همزن قرار دارد اضافه شد. هر قطره پس از تماس با کلرید کلسیم پلیمریزه شده وبه صورت گلوله‌های کوچکی در آمده قطر گویچه‌های حاصل در حدود ۴ میلی متر به‌دست آمد. خارج کردن آهسته کلرید کلسیم ۰/۲ مولار قبلی و جایگزین کردن کلرید کلسیم ۰/۲ مولار تازه روی دانه‌های حاصل جهت سفت و محکم شدن آنها و نگهداری در دمای ۴ °C به مدت ۲۴ ساعت شستشوی گویچه‌های حاصل با آب مقطر برای حذف یون‌های کلسیم اضافی به‌کار می‌رود، گویچه‌های حاصل را می‌توان در داخل ستون یا راکتور پر کرد و پساب حاوی رنگزا را از آن عبور داد [۱۱, ۲۰, ۲۱]. (شکل ۲)

[1] Cell Stabilizers
[2] Trapping
[3] Pakarajyman
[4] Agar
[5] Calcium Alginate
[6] Polyvinyle Alcohol (PVA)
[7] Poly Sulfone
[8] polyisoprene
[9] Alginic acid

شکل ۲- گویچه‌های آلژینات بعد از تثبیت سلولی با قارچ مرده.

۷- بحث و بررسی نمونه‌هایی از جذب بیولوژیکی رنگزاها توسط قارچ‌ها

در مطالعاتی برای حذف رنگزای راکتیو آبی ۴۹ [1] (RB49)، از مخلوط دو نوع قارچ در سیستم بچ و پیوسته استفاده شده است. در این کار ابتدا دو نمونه قارچ آگاریکوسبیسپورس [2] و توجا اورینتالیس [3] را تهیه کردیم و این نمونه‌ها را با آب دیونیزه به علت کاهش ناخالصی‌های موجود در بیومس‌ها شستشو می‌دهیم وبعد در دمای ۸۰ °C به مدت ۲۴ ساعت در آون قرار می‌دهیم تا خشک شوند، دو قارچ آگاریکوسبیسپورس و توجا اورینتالیس را به نسبت ۱:۲ با هم مخلوط می‌کنیم و حدود ۵ میلی لیتر آب دیونیزه ریخته تا خمیری شود و سپس طور کامل مخلوط کرده و خشک می‌کنیم این عمل شستن و خشک‌کردن را چندین بار انجام می‌دهیم تا بازده جذب جاذب‌ها افزایش یابد و بعد از خشک‌کردن مخلوط قارچ‌ها را در ظروف شیشه‌ای برای آزمایشات نگهداری می‌کنیم. میزان رنگزای جذب شده در حالت تعادل توسط رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۱۷].

$$q = \frac{C - C_e}{M} * V \qquad (۲)$$

q: جرم رنگزای جذب شده بر وزن بیوماس مرده (mg/g)

C_e: غلظت رنگزای باقیمانده در محلول در حالت تعادل بعد از جذب (ppm)

C_i: غلظت اولیه رنگزا قبل از جذب (ppm)

V: حجم محلول (L)

M: جرم بیوماس مرده (جاذب) (gr)

مقدار درصد جذب در غلظت‌های مختلف از رابطه ۳ پیروی می‌کند: [۱۱]

$$y = \frac{Ci - Ce}{Ci} * 100 \qquad (۳)$$

در سیستم بچ آزمایشاتی برای بهینه کردن عواملی مانند pH، مقدار جاذب و غلظت رنگزا انجام گردید. داده های مطالعه تاثیر pH نشان داد که این عامل بر ویژگی‌های سطح جاذب و درجه یونیزاسیون و بازده جذب تاثیر گذار است و با توجه به نتایج مشخص می‌شود که با افزایش pH، درصد جذب کاهش می‌یابد و یا می‌توان گفت که در pH اسیدی (pH=۱) جذب بیشتری را موجب می‌شود. رنگزا RB49 دارای گروه عاملی سولفونات است که در آب یونیزه شده و موجب آنیونی شدن رنگزا می‌شود. با توجه به آنالیز FTIR مشخص شده که در سطح قارچها گروه‌های عاملی هیدروکسیل، کربوکسیل، آمین و آمید می‌باشد، با افزایش pH باعث افزایش بار آنیونی سطح ذرات قارچ شده و در نتیجه نیروهای دافعه بین جاذب و مولکول رنگزا افزایش می‌یابد که سبب کاهش میزان جذب رنگزا RB49 بر سطح جاذب می‌شود. از عوامل موثر دیگر در مقدار جذب، مقدار جاذب مورد استفاده می‌باشد. که به این منظور فرآیند جذب در حضور مقادیر مختلف جاذب مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج مشاهده شد که با افزایش میزان بیومس جذب افزایش یافته بعد از مقدار بهینه ثابت باقی می‌ماند که در این آزمایشات از ۰/۲ تا ۳ گرم جذب افزایش یافته ولی در ۳ گرم به بعد مقدار جذب کاهش می‌یابد. به این دلیل که با افزایش مقدار جاذب سطوح قابل دسترس جاذب و مکان‌های پیوندی افزایش می‌یابد. در بررسی اثر غلظت رنگزا نشان می‌دهد که با افزایش مقادیر اولیه محلول رنگی میزان بازده حذف کاهش، اما ظرفیت جذب بیوجاذب افزایش می‌یابد. علت این امر احتمالاً این است که با افزایش بار سطحی (مواد جذب شونده) روی جاذب، به سرعت مکان‌های جذب سطوح بالایی روی جاذب اشباع شده و بازده حذف ماده جاذب کاهش می‌یابد. علت افزایش ظرفیت جذب جاذب‌ها با افزایش غلظت اولیه رنگ احتمالاً به خاطر افزایش برخورد و تماس بین جاذب و جذب شونده می‌باشد. برای انجام عملیات جذب در سیستم پیوسته از ستون شیشه‌ای استفاده می‌شود که با قرار دادن دو لایه از پشم شیشه در ستون قارچ یا جاذب را داخل ستون ریخته و در این سیستم دو عامل دبی و اثر ارتفاع بررسی می‌گردد. با افزایش سرعت جریان میزان درصد حذف کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت جریان ورودی به درون راکتور زمان داده شده برای جذب کاهش می‌یابد و سیستم سریع‌تر اشباع می‌شود ولی با سرعت جریان وردی کمتر، میزان رنگزای جذب شده افزایش می‌یابد. از سوی دیگر در سرعت جریان بالاتر فقط از نظر صرفه‌جویی در زمان دارای اهمیت می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی ارتفاع نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع به علت زیاد شدن زمان تماس بین یون‌های محلول و سطح جاذب درصد حذف رنگزا افزایش می‌یابد چون مکان‌های فعال و گروه‌های یونی بیشتری از سطح بیومس در دسترس می‌باشد [۲۲].

در مطالعاتی دیگر نیز برای حذف متیلن آبی از بیومس کورینوباکتریوم گلوتامیکوم گزارش شده است در حذف این رنگزا نیز آزمایشاتی در سیستم بچ برای بهینه‌کردن عواملی مانند pH، مقدار جاذب و غلظت رنگزا انجام گرفته و مشخص گردید که این رنگزا در آب یونیزه شده و به کاتیون تبدیل می‌گردد. آزمایش‌های جذب به منظور اثر pH در مقادیر

[1] Reactive Blue 49
[2] Agaricusbisporus
[3] Thujaorientalis

۸-۳ بررسی شد و با توجه به نتایج جاذب در مقادیر pH بالای ۶ به ماده رنگزای بازیک تمایل پیدا کند. با افزایش pH، مقدار رنگبری نیز افزایش یافته است. افزایش pH باعث می‌شود تا گروه‌های آمین دارای بار مثبت موجود در جاذب کمتر شوند و گروه‌های کربوکسی ایجاد شده بر روی آن فعال‌تر شوند و با مولکول‌های دارای بار مثبت ماده رنگزا پیوند الکترواستاتیکی برقرار نمایند، و در نتیجه مقدار رنگبری نیز افزایش می‌یابد.

نتایج حاصل از اثر مقدار جاذب و غلظت رنگزا همانند نتایج جذب بیولوژیکی RB49 توسط دو قارچ نام‌برده بود. ولی در سیستم پیوسته جذب بیولوژیکی رنگزای متیلن آبی، جاذب ک. گلوتامیکوم را در پلی سولفون تثبیت کردیم و سپس در داخل ستون که دارای قطر داخلی و ارتفاعی معین می‌باشد، پر می‌کنیم و در این سیستم اثر دبی و ارتفاع را بررسی کردیم که همانند نتایج جذب بیولوزیکی RB49 می‌باشد [۱۷].

۷-۱- عملیات دفع و بازیافت مجدد قارچ استفاده شده

از مزایای استفاده از قارچها و بیومس‌های دیگر این می‌باشد که می‌توان رنگزای جذب شده توسط قارچ را از آن جدا کرده و با این عمل می‌توان مجدداً برای عملیات جذب از قارچ استفاده نمود. مقدار قارچی را که در جذب سطحی رنگزا استفاده شده و حاوی رنگزا است را با میلی لیتر ۵۰ نیتریک اسید (HNO_3) و یا اسید سولفوریک ۲ نرمال مخلوط کردیم و در دمای ۶۰-۸۰ °C به مدت ۲ ساعت روی شیکر با سرعت ۱۵۰ rpm قرار دادیم. سپس قارچ را صاف کرده و با آب مقطر آنقدر شستشو دادیم که pH آن به حالت خنثی رسید و در دمای ۶۰-۸۰ °C در خشک کردیم [۱۷].

۸- بررسی معادلات مورد استفاده در جذب بیولوژیکی در سیستم ناپیوسته

۸-۱- بررسی ایزوترم‌های جذب سطحی

برای بررسی نتایج آزمایش‌های جذبی در سیستم ناپیوسته از ایزوترم‌های جذبی فروندلیش[1]، لانگمیر[2]، تمکین[3] استفاده شده است.

۸-۱-۱- مدل لانگمیر

معادله لانگمویر به برهم‌کنش بین جاذب و ماده جذب شونده به عنوان یک واکنش شیمیایی تک لایه، برگشت‌پذیر و خطی مربوط می‌شود. این رابطه توسط لانگمویر در ۱۹۱۵ بیان شد، این معادله یک مدل نسبتاً آسان است و فرض می‌شود که سطح جاذب به طور کامل یکنواخت بوده و هر سایت جاذب می‌تواند حداکثر یک مولکول جذب شونده را محصور نماید و هیچ برهم‌کنشی بین مولکول‌های جذب شونده وجود ندارد. این ایزوترم بر این فرض استوار است که نقاطی از ظرفیت روی سطح جاذب موجود بوده و هر کدام از این سایت‌ها قادر به جذب یک مولکول می‌باشد، بنابراین لایه‌های جذب شده دارای ضخامت یک مولکول خواهند بود. به‌علاوه، فرض می‌شود که همه مکان‌های جذب تمایل یکسان برای مولکول‌های ماده جذب شونده دارند و همچنین حضور مولکول‌های جذب شده روی یک سایت بر جذب سطحی مولکول‌ها در مکان مجاور تاثیری ندارد. مدل جذب لانگمویر را می‌توان به صورت رابطه‌های ۴ و ۵ بیان نمود [۲۳, ۲۴].

$$q = \frac{bq_{\max}Ce}{(1+bCe)} \qquad (۴)$$

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{bq_{\max}}\right)\left(\frac{1}{Ce}\right) + \frac{1}{q_{\max}} \qquad (۵)$$

$q_{\max}$ بیشینه مقدار رنگزای جذب شده در هر واحد از بیومس (mg/g)، q مقدار رنگزا جذب شده بر حسب میلی گرم بر گرم، C_e غلظت تعادلی (mg/l) و b ثابت تعادل اندازه‌گیری شده به طریقه تجربی (l/mg) است.

در رابطه لانگمویر هرگاه 1/q نسبت به $1/C_e$ رسم شود، شیب نمودار $\frac{1}{bq_{\max}}$ و عرض از مبدأ $\frac{1}{q_{\max}}$ می‌باشد.

۸-۱-۲- مدل فرندلیش

در مدل ایزوترم فرندلیش، یک سطح ناهمگن با توزیع غیریکنواختی از گرمای جذب در روی سطح، فرایند جذب را انجام می‌دهد این مدل به‌صورت رابطه‌های ۶ و ۷ می‌باشد.

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \qquad (۶)$$

$$\ln q_e = \ln K_F + \left(\frac{1}{n}\right)\ln Ce \qquad (۷)$$

که درآن q_e برابر میزان میلی گرم جذب شده به ازای واحد وزن (یک گرم) ماده جاذب، K_F ظرفیت جذب سطحی در واحد غلظت $(mg/g)(l/mg)^{1/n}$، C_e بار تعادلی روی جاذب (mg/g) و 1/n شدت جذب سطحی که به‌طور تجربی اندازه‌گیری می‌شود و گه‌گاه تحت عنوان β (بدون بعد) گزارش می‌شود.

معادله فرندلیش با فرض یکسان نبودن انرژی مکان جذب روی ماده جاذب و جذب چند لایه‌ای ماده جذب شونده بنا نهاده شده است .در این رابطه هرگاه مقدار $\ln q_e$ بر اساس $\ln c_e$ رسم شود و شیب معادله 1/n و عرض از مبدأ آن $\ln K_F$ می‌باشد. برای مواد جذب شده برگشت پذیر، 1/n (شیب خط) صفر است. برای مواد شیمیایی که به‌طور مطلوبی جذب شده‌اند، 1/n بین صفر و یک است. و اگر 1/n بزرگتر از یک باشد نامطلوب است [۲۳, ۲۴].

[1] Freundlich
[2] Langmuir
[3] Temkin

۸-۱-۳- مدل تمکین

این مدل برهم‌کنش بین نمونه‌های جاذب و جذب‌شونده را در نظر می‌گیرد. در این ایزوترم فرض می‌شود که ۱) گرمای جذب کلیه مولکول‌ها در لایه به‌صورت خطی بدلیل برهم‌کنش جاذب و جذب شونده کاهش می‌یابد و ۲) جذب با توزیع یکنواختی از انرژی‌های پیوندی مشخص می‌شود. هم‌دمای تمکین به این صورت به‌دست می‌آید [۲۵] (رابطه ۸).

$$q_e = RT\ln(AC_e)/b \qquad (۸)$$

با در نظر گرفتن RT/b=B

یک شکل خطی هم‌دمای تمکین به صورت رابطه ۹ خواهد بود:

$$q_e = B\ln A + B\ln C_e \qquad (۹)$$

در این رابطه A بر حسب (l/mg) معادل ثابت پیوند و مرتبط با بیشینه انرژی پیوند است، b بر حسب (J/mol) ثابت هم‌دمای تمکین، R ثابت جهانی گازها (8.314 j/mol.K)، T دمای مطلق بر مبنای کلوین و ثابت B (بدون واحد) متناسب با گرمای جذب سطحی است.

۸-۲- بررسی مدل‌های سینتیکی

به منظور بررسی روند سازوکار جذب بیولوژیکی از مدل‌های سنتیکی درجه اول و درجه دوم استفاده شد. مدل سنتیکی شبه مرتبه اول نشان می‌دهد که نفوذ از داخل یک لایه اتفاق می‌افتد و بر مبنای ظرفیت جامد می‌باشدکه در آن تغییرات در مقدار جذب با زمان، متناسب با تعداد مکان‌های اشغال نشده در سطح جاذب است. مدل سنتیکی مرتبه اول به صورت رابطه ۱۰ است [۲۶, ۲۷]:

$$\frac{dq}{dt} = K_1(q_e - q_t) \qquad (۱۰)$$

که در این رابطه q_e و q_t به ترتیب میزان جذب رنگزا در زمان تعادل و زمان t و برحسب mg/g بوده و K_1 ثابت سرعت واکنش درجه اول بر حسب min^{-1} است با انتگرال‌گیری از رابطه ۱۰ و اعمال شرط اولیه q(0)=0 رابطه ۱۱ به‌دست می‌آید.

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1 t}{2.303} \qquad (۱۱)$$

که در آن مقدار عددی K_1 با رسم منحنی خطی $\log(q_e-q_t)$ به صورت تابعی از t محاسبه می‌شود. مدل سنتیکی مرتبه دوم نشان می‌دهد که جذب شیمیایی مرحله کندکننده سرعت است و فرآیندهای جذب سطحی را کنترل می‌کند و بر مبنای جذب فاز جامد می‌باشد که در آن سرعت اشغال مکان‌های جذب، متناسب با مجذور تعداد مکان‌های اشغال نشده است و به‌صورت رابطه ۱۲ می‌باشد [۲۶, ۲۷].

$$\frac{dq}{dt} = K_2(q_e - q_t)^2 \qquad (۱۲)$$

که در آن با انتگرال‌گیری از رابطه ۱۲ و اعمال شرط اولیه q(0)=0 رابطه ۱۳ به‌دست می‌آید:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e}t \qquad (۱۳)$$

دراین رابطه K_2 ثابت سرعت واکنش ($\frac{gr}{mg\,\min}$) می‌باشد .با رسم نمودار t/q_t بر حسب t که از داده‌های آزمایشی به‌دست می‌آیند، مقدار q_e و K_2 را می‌توان از شیب و عرض از مبدا خط حاصل تعیین کرد. در این رابطه K_2 ثابت سرعت واکنش ($\frac{gr}{mg\,\min}$) می‌باشد. با رسم نمودار t/q_t بر حسب t که از داده‌های آزمایشی به‌دست می‌آیند، مقدار q_e و K_2 را می‌توان از شیب و عرض از مبدا خط حاصل تعیین کرد.

۹- رابطه‌های ریاضی در سیستم پیوسته

مدل‌های ریاضی بسیاری به منظور بررسی داده‌های تجربی حاصل با داده‌های تئوری در سیستم پیوسته ارائه شده است. از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین رابطه‌های توماس، یان می‌باشد.

مدل توماس بر اساس بقای جرم (توماس ۱۹۴۸) و با این فرض که تعادل جذب از مدل لانگمویر بدون پراکنش محوری پیروی می‌کند (بارال و همکارانش ۲۰۰۹)، توسعه یافته است. مدل ریاضی توماس به شکل رابطه ۱۴ است:

$$\ln\left(\frac{C_o}{C} - 1\right) = \frac{K_{TH} q_m M}{Q} - \frac{K_{TH} C_o V}{Q} \qquad (۱۴)$$

در این رابطه q_m که بیانگر بیشینه غلظت جذب شده در واحد جرم مواد ستون جاذب [$\frac{mg}{g}$]، K_{TH} ضریب سینتیکی یا ثابت نرخ جذب توماس [$\frac{l}{\min mg}$]، M مقدار جاذب gr، V حجم‌های خروجی از ستون mL، Q دبی وردی [$\frac{mL}{\min}$]، C_o غلظت ورودی به ستون [$\frac{mg}{l}$]، C غلظت خروجی از ستون [$\frac{mg}{l}$]، است [۱۱].

مدل Yun:

در این مدل فرض می‌شود، نرخ کاهش بخش جذب شده رنگزا موجود در محلول (dY/dt) متناسب با میزان رنگزای جذب شده (Y) و بخش باقیمانده در محلول ($X=C/C_0$) است:

$$-\frac{dY}{dt} = K_{YN} YX \qquad (۱۵)$$

با توجه به این که Y=1-X است، با قرار دادن X=0.5 به ازای t= τ (زمان استوکیومتری) و انتگرال‌گیری از رابطه ۱۵، رابطه ۱۶ به‌دست می‌آید:

$$\ln(\frac{C}{C_o - C}) = tk_{YN} - \tau k_{YN} \qquad (۱۶)$$

در این رابطه K_{YN} ضریب سینتیکی یا ثابت نرخ جذب Yun (min^{-1}) می‌باشد و τ نشان دهنده زمانی است که در آن غلظت خروجی بیانگر نصف غلظت ورودی می باشد، C_o غلظت ورودی به ستون بر حسب (mg/l) و C غلظت خروجی از ستون (mg/l) است. نمودار تجربی $\ln(\frac{C}{C_o - C})$ بر اساس زمان‌های نمونه‌برداری (t) رسم می‌شود [۱۱].

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله حذف رنگزاهای موجود در پساب‌ها توسط میکروارگانیسم بخصوص قارچ‌ها بررسی گردید. روش‌های جذب بیولوژیکی به مراتب کم هزینه‌تر نسبت به روش‌های شیمیایی می‌باشند. زیرا نیازی به دستگاه‌ها و مواد گران قیمت ندارند این روش‌ها بازده عمل بالایی دارند و زمان جذب و حذف آلاینده در این شیوه بسیار کوتاه‌تر از روش‌های شیمیایی است. همچنین سادگی در عملکرد یکی دیگر از ویژگی‌های این روش است. با مطالعات انجام شده مشخص شده است که بیوماس‌های غیر زنده قابلیت استفاده بهتری در مقایسه با انواع زنده جهت حذف آلاینده‌های رنگی را دارند، ضمن اینکه کنترل عوامل فرآیند حذف به‌وسیله انواع غیر زنده آسان‌تر می‌باشد. رنگزاها به گروه‌های عاملی موجود در سطح بیومس اتصال می‌یابند و بدین ترتیب جذب بیولوژیکی صورت می‌گیرد. برای بهتر شدن روش‌های جذب بیولوژیکی می‌توان از روش تثبیت سلولی در بستر استفاده نمود، سدیم آلژینات و پلی سولفون یکی از مواد تثبیت کننده بیومس‌ها می‌باشد که باعث افزایش بازده جذب در مدت زمان کم می‌شود. در ضمن رنگزای جذب شده توسط قارچ را می‌توان با قرار دادن در محلول اسید کلریدریک یا اسید نیتریک ۲ نرمال، دوباره از آن جدا کرده و با این عمل می‌توان مجدداً برای عملیات جذب از قارچ استفاده نمود. این عمل یکی از مزیت‌های جذب بیولوژیکی می‌باشد، حتی جاذب‌های تثبیت شده که به‌صورت گویچه هستند را نیز می‌توان با شستشو دادن با اسیدهای نام‌برده دوباره بازیافت کرد. در سیستم ناپیوسته برای بررسی ایزوترم جذب از مدل‌های فرندلیش و لانگمیر و بررسی سنتیکی جذب از معادلات درجه اول و دوم استفاده می‌شود. مدل‌های ریاضی بسیاری به منظور بررسی داده‌ها در سیستم پیوسته ارائه شده است. از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین رابطه‌های توماس و یان می‌باشد.

۱۱- مراجع

1. W. Coa, M. Mehrvar, "Slaughterhouse wastewater treatment by combined anaerobic baffled reactor (ABR) and UV/H_2O_2 processes", Chem. Eng. Res. Des., 89 (7), 1136-1143, **2011**.
2. S. M. D. A. Guelli-Ulson-de-Souza, K. A. S. Bonilla, A. Augusto-Ulson-de-Souza, "Removal of COD and color from hydrolyzed textile azo dye by combinedozonation and biological treatment", J. Hazard. Mater.179, 35-42, **2010**.
3. A. Dixit, A. J. Tirpude, A. K. Mungray, M. Chakraborty, "Degradation of 2, 4 DCP by sequential biological-advanced oxidation process using .UASB and UV/TiO_2/H_2O_2", Desalin.272, 265-269, **2011**.
4. S. Gul, O. Ozcan-Yıldırım, "Degradation of Reactive red 194 and Reactive yellow 145 azo dyes by O_3 and H_2O_2/UV-C processes", J. Chem. Eng. 155, 684-690, **2009**.
5. L. N. Du, B. Wang, G. Li, S. Wang, D. Crowley, Y. H. Zhao, "Biosorption of the metal-complex dye acid black 172 by live and heat-treated biomass of Pseudomonas sp. strain DY1; Kinetics and sorption mechanisms", J. Hazard. Mater., 205, 47-54, **2012**.
6. Y. Yang, G. Wang, B. Wang, ZS. Li, X. Jia, Q. Zhou, Y, Zhao, "Biosorption of Acid black 172 and Congo red from aqueous solution by nonviable penicillium YW 01: Kinetic study, equilibrium isotherm and artificial neural network modeling", Bioresour. Technol. 102, 827-834, **2011**.
7. K. Kumari, T. E. Abraham, "Biosorption of anionic textile dyes by nonviable biomass of fungi and yeast", Bioresour. Technol.98, 1704-1710, **2007**.
8. K. Vijayaraghavan, M. W. Lee, Y. S. Yun, "A new approach to study the decolorization of complex reactive dye bath effluent by biosorption technique", Bioresour. Technol., 99, 5778-5785, **2008**.
9. A. Homei, "Specialization and medical mycology in the US, Britain and Japan", Stud. Hist. Phil. Biol. & Biomed. Sci. 39, 80-92, **2008**.
10. L. Lange, "The importance of fungi for a more sustainable futureon our planet, fungal biology reviews", 24, 90-92, **2010**.
11. R. Marandi, "Biosorption of Hexavalent Chromium from Aqueous Solution by Dead Fungal Biomass of Phanerochaetecrysosporium: Batch and Fixed Bed Studies", J. Chem. Eng. Technol.2, 8-22, **2011**.
12. T. Akar, S. Celik, S.T. Akar, "Biosorption performance of surface modified biomass obtained Pyracanthacoccinea for the decolorization of dye contaminated solution", Chem .Eng. J., 160, 466-472, **2010**.
13. K. Vijayaraghavan, Y. S. Yun, "Bacterialbiosorbent and biosorption", Biotechnol. Adv. 26, 266-291, **2008**.
14. M. R. Samarghandi, M. NooriSepehr, M. Zarrabi, M. Norouzi, F. Amraie, "Mechanism and Removal efficiency of C. I. Acid Blake 1 by Pumice stone adsorbent", Iran. J. Health & Environ, 3, 399-410, **2011**.

15. R. Leena, D. Raj Selva, "Bio-decolourization of textile effluent containing reactive black-b by effluent- adapted and non-adapted bacteria", Afr. J. Biotechnol. 7 (18), 3309-3313, **2008**.
16. T. Akar, B. Anilan, A. Gorgulu, S. T. Akar, "Assessment of cationic dye biosorption characteristics of untreated and non-conventional biomass: Pyracanthacoccineaberries", J. Hazard. Mater. 168, 1302-1309, **2009**.
17. K. Vijayaraghavan, J. Mao, Y. S. Yun, "Biosorption of methyle blue from aqueous solution using free and poly solfone-immobilized corynebacteriumglutamicum: Batch and column studies", Bioresour. Technol. 29, 2864-2871, **2008**.
18. X. F. Sun, S. G. Wang, W. Cheng, M. Fan, B. H. Tian, "Enhancement of acidic dye biosorption capacity on poly (ethylenimine) grafted anaerobic granular sludge", J. Hazard. Mater. 189, 27-33, **2011**.
19. J. F. Gao, Q. Zhang, J. h. Wang, X. L. Wu, S. Y. Wang, Y. Z Peng, "Cotributions of functional groups and extracellular polymeric substances on the biosorption of dyes by aerobic granules", Bioresour. Technol. 102, 805-813, **2011**.
20. B. Preetha, T.Viruthagiri, "Batch and continuous biosorption of chromium (VI) by RhizopusArrhizus", Sep. Purif. Technol., 57, 126-133, **2007**.
21. G. Bayramoglu, G. Celik, M. Y. Arica, "Biosorption of Reactive blue 4 dye by native and treated fungusPhanerocheatechrysosporium: Batch and continuous flow system studies", J. Hazard. Mater. B137, 1689-1697, **2006**.
22. S. T. Akar, A. Gorgulu, Z. Kaynak, B. Anilan, T. Akar, "Biosorption of Reactive blue 49 dye under batch and continuous mode using a mixed biosorbent of macro-fungus Agaricusbisporus and Thujaorientalis cones", Chem. Eng. J.148, 26-34, **2009**.
23. A. R. Khataee, F. Vafaei, M. Jannatkhah, "Biosorption of three textile dyes from contaminated water by filamentous green algal Spirogyra sp: Kinetic, isotherm and thermodynamic studies", Int. Biodeterior. Biodegrad.83, 33-40, **2013**.
24. M. E. Haddad, R. Slimani, R. Mamouni, M. R. Laamari, S. Rafqah, S. Lazar, "Evaluation of potential capability of calcined bones on the biosorption removal efficiency of safranin as cationic dye from aqueous solutions", J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 44, 13-18, **2013**.
25. M. M. Areco, M. D. S.Afonso, "Copper, zinc, cadmium and lead biosorption by Gymnogongrustorulosus. thermodynamics and kinetics studies", Colloids Surf. B: Biointerfaces.81, 620-628, **2010**.
26. J. F. Gao, Q. Zhang, K. Su, J. H. Wang, "Competitive biosorption of Yellow 2G and Reactive brilliant red K-2G onto inactive aerobic granules: Simultaneous determination of two dyes by first-order derivative spectrophotometry and isotherm studies", Bioresour. Technol. 101, 5793-5801, **2010**.
27. E. Daneshvar, M. Kousha, M. S. Sohrabi, A. R. Khataee, A, Converti, "Biosorption of three acid dyes by the brown macroalgaStoechospermummarginatum: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies", Chem. Eng. J. 195-196, 297-306, **2012**.