بررسی اثر جریان حجمی روي منحنی عبور و ضریب انتقال جرم سالیسیلیک اسید در فرایند جذب سطحی توسط رزین آنیونی IRA-93 و ارایه جریان بهینه خوراک

سمیه کنعان پناه+، حسین ابوالقاسمي*
تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌هاي فني، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده: هدف این پژوهش، بررسی اثر جریان حجمی روی منحنی عبور تجربی و ضریب کلی انتقال جرم حجمی تجربی جهت بازیابی سالیسیلیک اسید به کمک فرایند جذب سطحی به وسیله‌ي رزین آنیونی IRA-93 به منظور تعیین گستره‌ي جریان حجمی بهینه خوراک است. نتیجه‌ها نشان داده‌اند که رزین تبادل یونی IRA-93 قابلیت جذب سالیسیلیک اسید را داراست. در این کار پژوهشي، میزان جذب سالیسیلیک اسید در چهار جریان حجمی مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان دادند که در چنین فرایندهایی باید گستره‌ي جریان بهینه تعیین شود. هم‌چنین ضریب انتقال جرم به‌روش نظري موجی ثابت، مورد بررسي قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان دادند که با افزایش جریان حجمی خوراک ضریب انتقال جرم نیز افزایش می‌یابد. جریان بهینه‌ي ۷ میلی لیتر بر دقیقه برای این سامانه پیشنهاد شده است. در این جریان سامانه دارای ظرفیت اشباع جذب مناسب و میزان انتقال جرم مطلوب است.

واژه‌های کلیدی: جذب سطحی، رزین تبادل یونی، سالیسیلیک اسید، IRA-93 ، منحنی عبور، جریان حجمی خوراک، نظریه‌ي موجی ثابت، ضریب انتقال جرم

KEY WORDS: *Adsorption, Ion-exchange resin, Salicylic acid, IRA-93, Breakthrough curve, Volumetric feed flow rate, Constant wave propagation theory, Mass transfer coefficient*

مقدمه

فرایند جذب سطحی از جمله عملیات صنعتی است که به دلیل انتخاب‌پذیری و بازده بالا و نیز شرایط عملیاتی مناسب، کاربردهای روز افزونی پیدا کرده است. استفاده از این روش در جداسازی مواد با غلظت بسیار کم (در حد ppm) و حتی در جداسازی ترکیب‌هاي مشابه مثل ایزومرها و ایزوتوپ‌ها نیز بسیار مؤثر است. به همین دلیل در اکثر فرایندهای جداسازی، خالص‌سازی، پاک‌سازی و بازیابی هم فاز گاز و هم فاز مایع قابل استفاده است [۵ ـ ۱].

هنگامی که یک جاذب در تماس با یک سیال با غلظت معین قرار داده می‌شود، عمل جذب سطحی اتفاق می‌افتد و بعد از گذشت زمان کافی، جاذب و سیال به تعادل یا حجم اشباع جاذب می‌رسند [۶].

امروزه جاذب‌های بسیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند برای مثال، کربن فعال برای جذب بسیاری از مواد آلی کاربرد وسیعی دارد. ولی پاسخ ضعیف این جاذب به احیاء شدن از معایب آن شمرده می‌شود. از این‌رو جاذب‌های پلیمری مانند

**عهده دار مکاتبات*
+E-mail:ripi.kn@gmail.com

رزین‌های تعویض یونی[۱] بر کربن فعال ترجیح داده می‌شوند [۳، ۸، ۹، ۱۰]. تنوع بسیار زیاد رزین‌های تعویض یونی باعث کاربرد روز افزون آن‌ها در صنایع گوناگون، بازیافت مواد مفید و ارزشمند، تصفیه آب و مطالعه‌هاي زیست محیطی شده است [۱۱ـ ۹]. بیشترین کاربرد رزین‌های تعویض یونی در استخراج، جداسازی و تغلیظ یون‌های ویژه است و برای محلول‌های با غلظت پایین نیز استفاده می‌شوند. این امر باعث توجه پژوهشگران برای بررسی عملکرد رزین‌های تعویض یونی در تصفیه، پالایش و بازیافت مواد با ارزشی چون ترکیب‌هاي فنول شده است [۲، ۳، ۱۴، ۱۵]. جذب ترکیب‌هاي فنولی روی رزین‌های تعویض یونی به وسیله‌ي بسیاری از پژوهشگران بررسی شده است [۲، ۵، ۱۹ ـ ۱۶].

جاذب مورد بررسی در این پژوهش رزین از نوع امبرلایت[۲] آنیونی IRA-93 است، که در اثر تعویض یون، آنیون‌های موجود در محلول، با آنیون‌های موجود در رزین تعویض می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که هم محلول و هم رزین از نظر الکتریکی خنثی باقی می‌مانند. در اینجا تعادل جامد ـ مایع رخ می‌دهد [۲۰].

از آنجا که بحث سلامت عمومی و مسایل زیست محیطی از جمله مباحث حائز اهمیت در صنایع می‌باشد و پساب‌های دارای ترکیب‌هاي فنولی به علت تجزیه بیولوژیکي بسیار کند، باعث بروز مشکلات زیست محیطی جدی می‌شوند، حذف آن‌ها از پساب‌ها حائز اهمیت است [۲]. از سوي دیگر سالیسیلیک اسید، یک ترکیب دارویی است که امروزه از فنول تهیه می‌شود. سالیسیلیک اسید کاربردهای زیادی در صنایع آرایشی و دارویی به عنوان ماده مؤثر روی آکنه دارد. همچنین از این ماده به عنوان نگهدارنده در صنایع غذایی و در کشاورزی به عنوان محافظ در برابر حشره‌ها و بیماري‌های گیاهی استفاده می‌شود [۱۲، ۱۳، ۱۵، ۱۶]. از این‌رو، بازیابي این اسید از نقطه نظر صنعتي حائز اهمیت است. در این پژوهش از سالیسیلیک اسید به عنوان ماده جذب شونده استفاده شده است.

کارایی هر فرایندی که برمبنای جذب سطحی است به‌طور گسترده‌ای وابسته به ویژگي‌هاي طراحي و شرایط عملیاتی است. برای طراحی و شرایط عملیات مناسب‌تر در فرایندهای جذب سطحی در ستون‌های بستر ثابت، منحنی‌های جذب هم‌دما و پویا بستر ثابت باید مورد بررسی قرار گرفته شوند [۱۲، ۱۸، ۲۱]. هدف از بررسي دینامیك بستر ثابت، بررسي تاثیر جریان حجمي روي منحني عبور و در نتیجه بررسي تأثیر آن بر میزان ظرفیت اشباع جاذب و میزان انتقال جرم است. پژوهشگران متعددي تاثیر جریان حجمي در فرایند جذب را بررسي کرده‌اند و به‌طور کلي نشان داده‌اند که افزایش جریان حجمي تأثیر بسزایي در افزایش میزان انتقال جرم دارد [۲، ۱۱، ۱۲، ۱۸].

هدف از این مطالعه، بررسی جذب سالیسیلیک اسید روی رزین آنیونی IRA-93 است، تا با بررسی اثر جریان حجمی خوراک روی منحنی عبور بتوان گستره جریان حجمی خوراک بهینه برای این سامانه را به‌دست آورد. همچنین نحوه عملکرد رزین آنیونی در جریان‌های حجمی متفاوت خوراک مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت ضریب انتقال جرم تجربی در تمام جریان‌های خوراک محاسبه شده است. براي محاسبه ضریب انتقال جرم از نظریه‌ي موجي ثابت[۳] استفاده شده‌است. در این نظریه نسبت غلظت حل شونده در فاز ثابت و متحرک همواره ثابت در نظر گرفته می‌شود [۱۲، ۱۸، ۲۲].

بخش تجربي

مواد شیمیایی و جاذب‌ها

خوراک مورد استفاده در این آزمایش‌ها شامل محلول سالیسیلیک اسید ($C_7H_6O_3$) به عنوان ماده جذب شونده (محصول شرکت مرک آلمان با خلوص ۹۹درصد) و آب مقطر است. ویژگي‌هاي سالیسیلیک اسید در جدول ۱ آمده‌است. در این مطالعه رزین آنیونی IRA-93 به عنوان جاذب برای جذب سالیسیلیک اسید مورد استفاده قرارگرفته است. ویژگي‌هاي این رزین در جدول ۲ آمده است.

آماده سازی رزین

ابتدا رزین IRA-93 به مدت یک ساعت به وسیله‌ي آب مقطر شستشو داده شد تا به اندازه کافی متورم شود. سپس برای تبدیل رزین از صورت Cl^- به صورت OH^-، رزین با محلول دو مولار HCl و بعد از آن به وسیله‌ي محلول دو مولار NaOH شستشو داده می‌شود.

روش انجام آزمایش

فرایند ناپیوسته[۴]

در فرایند ناپیوسته جذب سالیسیلیک اسید به عنوان ماده جذب شونده (محصول شرکت مرک آلمان) در غلظت‌های اولیه متفاوت روی رزین IRA-93 مورد بررسی قرار گرفت.

براي انجام آزمایش‌ها فرایند ناپیوسته، پس از آماده سازی رزین، به میزان یک گرم از رزین مرطوب درون بشر قرار داده شد و سپس به میزان ۴۰ ml از محلول‌های ساخته شده از سالیسیلیک اسید

(۱) Ion exchange resin
(۲) Amberlite
(۳) Constant wave propagation theory
(۴) Batch process

جدول۱ـ ویژگي‌هاي سالیسیلیک اسید مورد استفاده.

نام IUPAC	2-Hydroxybenzoic acid
فرمول مولکولی	$C_7H_6O_3$
جرم مولی	138.123 g/mol
چگالی	1.44 g/cm³ (at 20 °C)
دمای ذوب	159 °C
دمای جوش	211 °C (2666 Pa)
درصد خلوص	99.5%

جدول۲ـ ویژگي‌هاي رزین مورد استفاده.

جاذب	IRA-93
توضیح	Gel Type I Weak Base Anion Exchange Resin.
ساختار پلیمری	Cross-linked polystyrene, macro porous
ویژگي‌هاي ظاهری	Semi-transparent spherical beads
گروه عاملی	-N(CH3)2.H2O
صورت یونی شکل گرفته	Free base
اندازه‌ي مش (US Std.)	16-50
حجم کلی تعویض یون Cl^- مرطوب، حجمی	1.4 meq/mL

در غلظت‌های اولیه متفاوت (۴۰۰ppm، ۵۰۰ppm، ۶۰۰ppm، ۷۰۰ppm، ۸۰۰ppm) بر روی رزین ریخته شد.

محلول‌ها درون لرزاننده با دور مناسب حدود ۱۶۵ rpm و در دمای محیط قرار داده شدند. بعد از گذشت ۴۸ ساعت سامانه‌ي ناپیوسته به تعادل رسیده و مقدارهاي غلظت تعادلی در فاز محلول توسط معادله موازنه جرم زیر به غلظت تعادلی در فاز جامد تبدیل شد:

$$q=\frac{(C_0-C_e)V}{W} \qquad (۱)$$

در این معادله q غلظت تعادلی در فاز جامد، C_0 غلظت اولیه، C_e غلظت تعادلی در فاز محلول، V حجم محلول و W وزن رزین می‌باشد.

فرآیند پیوسته[۱]

آزمایش‌ها در یک ستون شیشه‌ای به قطر ۱ cm و طول بستر ۱۰ cm انجام گرفت که دستگاه مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است. در دو انتهای ستون از بست‌های پلی‌اتیلن مخصوص برای اتصال به پمپ استفاده شده‌است. پمپ مورد استفاده از نوع پری‌استاتیک (SP311-Welp) با قابلیت کنترل جریان حجمی به‌صورت دیجیتالی بود. رزین‌ها درون ستون به وسیله‌ي توری مخصوص مهار شدند. در خروجی ستون ظروف مخصوص نمونه برداری تعبیه شده بود.

برای انجام آزمایش‌ها ابتدا ۴ گرم از رزین‌های آماده سازی شده درون ستون جذب قرار داده شدند و پس از کالیبره کردن پمپ، محلولی با غلظت ۶۰۰ ppm سالیسیلیک اسید تهیه شد و از راه پمپ با جریان رو به بالا وارد ستون شد. از آنجا که تشخیص دقیق نقاط شکست در منحنی عبور حائز اهمیت است، محلول خروجی از ستون به‌طور متوسط هر هفت دقیقه یک‌بار درون ظروف ویژه برای اندازه‌گیری غلظت جمع آوری شد تا به واحد آنالیز انتقال یابد. نمونه‌گیری از سامانه به‌مدت هشت ساعت انجام شده تا رزین مورد بررسی اشباع شود و دیگر جذبی به وسیله‌ي آن صورت نگیرد.

آنالیز داده‌ها

میزان غلظت سالیسیلیک اسید محلول خروجی به وسیله‌ي دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis در طول موج ۲۹۵ nm اندازه‌گیری شد.

بررسی منحنی عبور در چهار جریان حجمی متفاوت خوراک ۵/۵، ۷، ۸/۵ و ۱۰ میلی‌لیتر بر دقیقه روی رزین انجام شد. تمام آزمایش‌ها در دمای محیط انجام شده است.

در این کار پژوهشي با توجه به اینکه دماي آزمایشگاه ۲۵ ± ۲°C تغییر داشته است، امکان بروز مقداري خطا اجتناب‌ناپذیر است.

هم‌چنین به‌دلیل استفاده از روش اسپکتروفتومتري امکان بروز خطا در روش اندازه‌گیري نیز وجود داشت. به‌منظور تضمین درستي داده‌های به‌دست آمده برخي از آزمایش‌ها تکرار شده‌اند.

نتیجه‌ها و بحث

فرایند ناپیوسته و منحني‌هاي هم‌دماي جذب

منحنی هم‌دمای جذب رابطه‌ي تعادلی بین غلظت در فاز سیال و غلظت در ذره‌هاي جاذب در دمای مشخص است. برای بررسی منحنی‌های هم‌دما به داده‌های تعادلی حاصل از فرایند ناپیوسته نیاز است. شکل ۲ نتیجه‌هاي حاصل از غلظت تعادلی در فاز مایع (C_e) بر حسب غلظت تعادلی در فاز جامد (q) را نشان می‌دهد.

(۱) Continuous process

نتیجه‌هاي حاصل از فرایند ناپیوسته به وسیله‌ي منحنی‌های هم‌دمای جذب لانگمویر[۱] و فروندلیچ[۲] مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

منحنی هم‌دمای جذب لانگمویر

منحني هم‌دماي لانگمویر در سال ۱۹۱۸ میلادي ارایه شد و به‌طور عمومي با فرض وجود یک سطح یکنواخت به‌دست آمده است. در این نوع هم‌دما یک لایه از مولکول‌های ماده حل شده جذب جامد می‌شوند. هم‌چنین در تمامی سطوح جاذب، مقدار انرژی جذب یکسان فرض شده است [۱۸]. معادله‌ي هم‌دماي لانگمویر به صورت زیر است:

$$q = \frac{Kq_m c}{1 + Kc} \qquad (۲)$$

در معادله بالا q غلظت در فاز جامد، q_m بار ماده جذب شونده، c غلظت در فاز سیال، و K ثابت جذب لانگمویراست.

ضریب‌هاي معادله به کمک داده های آزمایشگاهی به‌وسیله‌ي نرم افزار Eviews بر مبنای روش حداقل مربعات (OLS) تعیین شده است که نتیجه‌ها در جدول ۳ مشاهده مي‌شوند.

منحنی هم‌دمای جذب فروندلیچ

هم‌دماي جذب فروندلیچ از سال ۱۹۲۶ میلادي به طور وسیعی در فرایندهای جذب سطحی به‌کار برده می‌شود. معادله‌ي این نوع جذب، یک مورد ویژه جهت انرژی‌های سطح نا متجانس جهت پارامتر انرژی K در معادله لانگمویر است که بر حسب یک عامل پوشش سطحی به شدت به علت تغییرها در گرمای جذب تغییر می‌یابد. در این حالت فرض می‌شود که مناطق موجود روی سطح جسم جاذب، یکنواخت نبوده و قدرت جذب متفاوتی داشته باشند. این معادله که به‌صورت تجربی به‌دست آمده به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

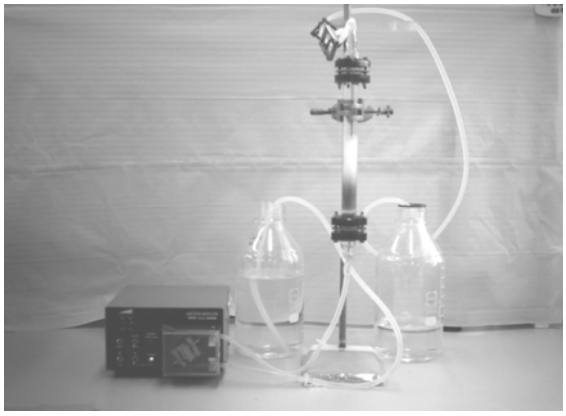
$$q = kc^n \qquad (۳)$$

در این معادله q غلظت در فاز جامد، c غلظت در فاز مایع، k و n عددهاي ثابت هستند.

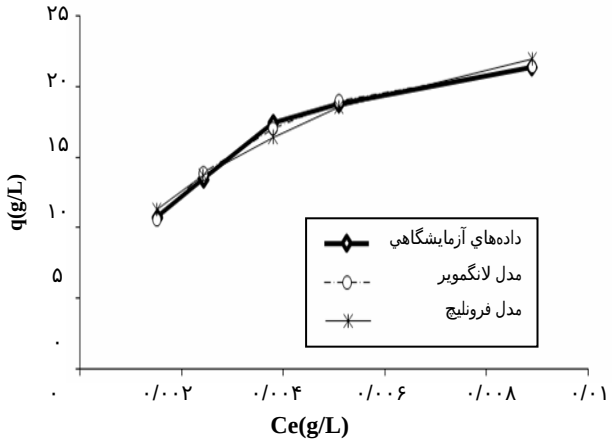
ضریب‌هاي معادله به کمک داده‌های آزمایشگاهی توسط نرم افزار Eviews بر مبنای روش حداقل مربعات (OLS) تعیین شده است که نتیجه‌ها در جدول ۴ مشاهده می‌شوند.

جدول ۳ـ نتیجه مدل سازی منحنی جذب لانگمویر.

در ۲۵ °C	پارامتر	معادله	مدل
۳۸٦/٤٤	b	$q = \frac{Kq_m c}{1 + Kc}$	لانگمویر
۲۸/۵۷	q_m		
۰/۹۹	R^2		
۰/۹۹	R^2 ـ تنظیم شده		



شکل۱ـ دستگاه جذب سطحی به وسیله‌ي رزین مورد استفاده.



شکل۲ـ نتیجه‌هاي حاصل از فرآیند ناپیوسته برای دو هم‌دماي جذب لانگمویر و فروندلیچ براي جذب سالیسیلیك اسید روي رزین **IRA-93**.

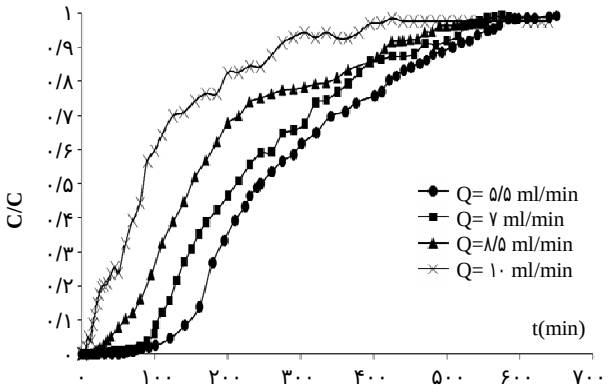
همان‌طور که از جدول‌هاي ۳ و ۴ مشاهده می‌شود هر دو مدل لانگمویر و فروندلیچ از همپوشانی مناسبی با داده‌های تجربی برخوردارهستند. ولی از آنجا که برای محاسبه ضریب انتقال جرم سامانه‌ي جذب به منحنی ایزوترم با معادله‌ي ساده‌تر نیاز است، منحنی ایزوترم فروندلیچ مبنای محاسبه‌ها قرار داده مي‌شود.

(۱) Longmuir

(۲) Freundlich

جدول ۴ ـ نتیجه مدل‌سازی منحنی جذب ایزوترم فروندلیچ.

در ۲۵ °C	پارامتر	معادله	مدل
۱۶۱/۰۵	k	$q=kc^n$	فروندلیچ
۰/۳۱	N		
۰/۹۸	R^2		
۰/۹۷	R^2 ـ تنظیم شده		



شکل ۳ ـ منحنی‌های عبور تجربی برای جذب سالیسیلیک اسید روی رزین **IRA-93** در چهار جریان حجمي متفاوت.

فرایند پیوسته

بررسی اثر جریان حجمی خوراک و پیشنهاد محدوده جریان بهینه

با توجه به اینکه میزان جریان حجمی خوراک بر مهم‌ترین پارامتر عملیاتی یعنی زمان عملیات تاثیر مستقیم دارد از این‌رو، بررسی جریان حجمی خوراک حائز اهمیت است.

به منظور بررسی اثر جریان حجمی خوراک بر جذب سالیسیلیک اسید به وسیله‌ي رزین آنیونی IRA-93 ، منحنی‌های عبور به‌دست آمده از آزمایش‌ها تجربی در شکل ۳ آورده شده‌اند. شکل ۳ نتیجه‌ها را برای جذب سالیسیلیک اسید روی رزین IRA-93 در چهار جریان حجمی ۵/۵، ۷، ۸/۵ و ۱۰ میلی لیتر بر دقیقه نشان می‌دهد.

با توجه به نتیجه‌هاي تجربی مشاهده مي‌شود که با افزایش جریان حجمی خوراک زمان کمتری برای رسیدن به انتهای عمل جذب مورد نیاز است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود در جریان ۱۰ میلی‌لیتر بر دقیقه زمانی حدود ۴۰۰ دقیقه برای اتمام عمل جذب نیاز است ولی از طرف دیگر با افزایش جریان حجمی خوراک مدت زمان تماس مورد نیاز برای اشباع شدن رزین نیز کاهش می‌یابد همچنین در شکل ۳ برای جریان ۱۰ میلی لیتر بر دقیقه مشاهده می‌شود که در زمان تماسی کمتر از ۵ دقیقه سامانه از حالت حداکثر جذب خارج شده است به‌عبارت دیگر در جریان بیش از ۱۰ میلی‌لیتر بر دقیقه دیگر هیچ زمان جذب کاملی در سامانه موجود نیست. به طور کلی کاهش ظرفیت جذب اثری منفی محسوب می‌شود پس باید افزایش جریان تا آنجا ادامه یابد که اثر کاهشی چشمگیری در سامانه اعمال نکند. یا به عبارت دیگر میزان ظرفیت جذب برای جاذب با کاهش جریان حجمی خوراک افزایش می‌یابد به بیان دیگر رزین دیرتر اشباع می‌شود. از سوي دیگر در شکل ۳ مشاهده می‌شود در جریان ۵/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه در زمان تماسی حدود ۱۰۰ دقیقه سامانه از حالت حداکثر جذب خارج شده است به عبارت دیگر در جریان ۵/۵ میلی لیتر بر دقیقه سامانه دارای بیشترین ظرفیت جذب است.

همچنین زمانی حدود ۶۸۰ دقیقه برای اتمام عمل جذب نیاز است که زمانی حدود ۷ ساعت کار روزانه است این موضوع نشان دهنده این است که فرایند با جریان حجمی کمتر به سمت زمان شکست دیرتر پیش می‌رود، در نتیجه ظرفیت جذب بالاتری ایجاد مي‌شود. از طرفی مدت زمان اتمام آزمایش نیز طولانی و بیش از ۷ ساعت کار روزانه می‌شود. هم‌چنین جریان کمتر از ۵/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه به زمان طولانی‌تری برای انجام فرایند جذب نیازمند است، که این از نظر کار صنعتی ایده آل نیست. از سوي دیگر جریان بالاتر از ۷ میلی‌لیتر بر دقیقه نیز مناسب نیست زیرا با جریان بیش از ۷ میلی لیتر بر دقیقه ظرفیت اشباع جذب به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین باید سامانه در گستره جریان حجمی بهینه مورد استفاده قرار گیرد. برای سامانه جذب مذکور گستره جریان حجمی خوراک بین ۵/۵ تا ۷ میلی لیتر بر دقیقه به عنوان بازده جریان بهینه پیشنهاد می‌شود.

بررسی ضریب انتقال جرم سامانه جذب سالیسیلیک اسید به وسیله‌ي رزین **IRA-93**

برای تأیید گستره‌ي جریان بهینه تأثیر جریان حجمی بر ضریب‌هاي انتقال جرم اندازه‌گیری شد. همان‌طور که بیان شد در محاسبه ضریب انتقال جرم از مدل فروندلیچ به دلیل سادگی معادله آن نسبت به مدل لانگمویر استفاده شده است.

برای محاسبه ضریب انتقال جرم از الگوی نظریه‌ي موجی ثابت استفاده شده است. براي اثبات این مدل از نرخ جذب اسید با مدل خطی نیروی محرکه و ضریب کلی انتقال جرم فاز مایع که به صورت زیر تعریف می‌شود، استفاده شده است:

$$\rho\frac{\partial q}{\partial t}=K_L a(C-C^*) \qquad (۴)$$

که در آن:

C^* غلظت در فاز مایع در تعادل با غلظت در فاز جامد،

q غلظت در فاز جامد در تعادل با غلظت در فاز مایع،

a مساحت سطح انتقال جرم بر واحد حجم بستر

K_L ضریب کلی انتقال جرم در فاز مایع

K_La ضریب کلی انتقال جرم حجمی در فاز مایع، می‌باشد.

شرایط مرزی و اولیه در ارتباط با معادله (۴) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\text{At } t=0,\ C=0 \text{ for } 0\le z\le L$$
$$\text{for } t>0,\ \text{at } z=0,\ C=C_F$$

با توجه به الگوی نظریه‌ي موجی ثابت نسبت غلظت حل شونده در فاز ثابت و متحرک همواره ثابت در نظرگرفته می‌شود [۱۲، ۱۸، ۲۲]:

$$\frac{q}{C}=\frac{q_F}{C_F} \qquad (۵)$$

که در آن C_F غلظت خوراک در فاز متحرک، q_F غلظت در تعادل با C_F در فاز ساکن هستند.

با جایگذاری معادله‌هاي (۵) و فروندلیچ در معادله‌ي (۴) و سپس انتگرال‌گیری از آن معادله‌ي، منحنی عبور به‌دست می‌آید:

$$t=t_{1/2}+\frac{\rho k C_F^{n-1}}{K_L a}\left[\int_{1/2}^{X}\frac{1}{X-X^{1/n}}dX\right] \qquad (۶)$$

$X=C/C_F$ غلظت بدون بعد جذب شونده است. $t_{1/2}$، زمان نیم عمر برای $X=0/5$ است. در معادله‌ي (۶) پارامتر $t_{1/2}$ به وسیله اطلاعات تجربی به‌طور مستقیم از روی منحنی عبور به‌دست می‌آید. با مشتق‌گیری از معادله‌ي بالا در $X=0/5$، شیب منحنی عبور در $X=0/5$ حاصل می‌شود:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_{X=.5}=\frac{K_L a}{\rho k C_F^{n-1}}(X-X^{1/n}) \qquad (۷)$$

برای محاسبه پارامتر K_La ابتدا به کمک شکل ۳ شیب هر کدام از منحنی‌های جریان حجمی در $X=0/5$ به‌دست آمده و سپس به‌کمک معادله‌ي ۷ پارامتر K_La محاسبه شده است.

جدول ۵ ـ ضریب‌هاي کلی حجمی انتقال جرم.

رزین	Q(ml/min)	K_La (min^{-1})
IRA-93	۵/۵	۱۰۷/۶۷
	۷	۱۶۶/۸۹
	۸/۵	۲۵۸/۴۲
	۱۰	٤۱٤/۵٤

به‌طور کلی ضرایب انتقال جرم (K_La) برای جریان‌های حجمي ۵/۵، ۷، ۸/۵ و ۱۰ میلی لیتر بر دقیقه با استفاده از شکل ۳ و معادله‌ي (۷) محاسبه شده و نتیجه‌ها در جدول ۵ آورده شده است.

از جدول ۵ مشاهده می‌شود با افزایش جریان حجمی خوراک میزان انتقال جرم نیز افزایش یافته است. ولی این بدین معنی نیست که جریان قابل افزایش تا هر اندازه است. بلکه از شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش جریان از ۷ به ۱۰ میلی لیتر بر دقیقه زمان تماس برای رسیدن به ظرفیت اشباع جذب رزین از حدود ۱۰۰ دقیقه به کمتر از ۵ دقیقه کاهش یافته است. از آنجا که پارامتر ظرفیت اشباع جذب نقش موثری در میزان جذب دارد، در نتیجه جریان حجمی خوراک را نمی‌توان به هر اندازه افزایش داد. به‌عبارت دیگر زمان تماس، تعیین کننده ظرفیت اشباع جذب و در نتیجه میزان انتقال جرم است. و همان‌طور که در پیش بیان‌شد گستره جریان بهینه برای این سامانه ۵/۵ تا ۷ میلی لیتر بر دقیقه است، و بیشترین میزان انتقال جرم در این گستره‌ي بهینه مربوط به جریان ۷ میلی لیتر بر دقیقه است، در نتیجه بهترین جریان حجمی خوراک جریان ۷ میلی‌لیتر بر دقیقه است زیرا در این جریان هم ظرفیت اشباع جذب و هم میزان انتقال جرم مطلوب است.

نتیجه‌گیري

از آزمایش‌هاي انجام شده می‌توان نتیجه‌هاي زیر را بیان کرد:

- با افزایش جریان حجمی خوراک میزان ظرفیت جذب سالیسیلیک اسید برای جاذب IRA-93 کاهش می‌یابد. بنابراین با جریان حجمی خوراک کمتر، زمان شکست بیشتر می‌شود. به بیان دیگر رزین سریع‌تر اشباع می‌شود.

- با توجه به اینکه افزایش جریان حجمی میزان ظرفیت جذب را کاهش می‌دهد، بنابراین، در این پژوهش گستره‌ي دبی بهینه مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه‌ها نشان داد که بازه‌ي جریان بهینه بین ۵/۵ تا ۷ میلی لیتر بر دقیقه است.

- با بررسی دو مدل ایزوترم جذب لانگمویر و فروندلیچ مشاهده شد که هر دو مدل دارای همپوشانی خوبی با داده‌های تجربی هستند. ولی با توجه به صورت ساده‌تر مدل فروندلیچ، در محاسبه‌هاي ضریب انتقال جرم این مدل مبنای کار قرار گرفته است.

- با محاسبه ضریب انتقال جرم به روش نظري موجی ثابت مشاهده شد که با افزایش جریان حجمی خوراک، ضریب انتقال جرم نیز افزایش می‌یابد. نتیجه‌ها نشان داد که به هر میزان نمی‌توان جریان را افزایش داد چون ظرفیت اشباع جذب رزین کاهش می‌یابد

- به منظور تأیید گستره‌ي جریان بهینه ،تاثیر جریان حجمی بر ضریب‌هاي انتقال جرم اندازه‌گیری شد و نتیجه‌ها نشان داد که در گستره‌ي جریان بهینه ۵/۵ تا ۷ میلی لیتر بر دقیقه، بهترین انتقال جرم مربوط به جریان حجمي ۷ میلی لیتر بر دقیقه است، بنابراین، با توجه به اینکه میزان انتقال جرم از مهم‌ترین پارامترهای فرایند جذب است در نتیجه جریان حجمي ۷ میلی لیتر بر دقیقه به‌عنوان بهترین جریان حجمي عملیاتی فرایند جذب سالیسیلیک اسید بر روی رزین IRA-93 پیشنهاد می‌شود.

- با توجه به کاربرد روز افزون سالیسیلیك اسید در صنایع دارویي و غذایي و کشاورزي، مي‌توان نتیجه گرفت که نتیجه‌هاي این پژوهش که شامل میزان ظرفیت اشباع جاذب، جریان حجمي بهینه و مقدار ضریب انتقال جرم مي باشند، راهکار مناسب جهت طراحي اولیه فرایند را در اختیار پژوهشگران قرار خواهد داد. هم‌چنین به‌دلیل کاربرد وسیع سالیسیلیك اسید در صنایع گوناگون، بازیابي این ماده ارزشمند از جاذب نیز اهمیت دارد که مي‌تواند در پژوهش‌هاي آتي مورد بررسي قرار گیرد.

تاریخ دریافت: ۸۶/۱۱/۱۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۸/۲۰

مراجع

[1] Jamshidi, E., Ale-Ebrahimi, H., Modeling of Adsorption in Continues Fixed Bed and Solving Equations with Quantize Method, *Chem. Eng. Sci.*, **54**, p. 859 (1999).

[2] Marta Otero,Miriam Zabkova,Alirio,E.Rodrigues, Comparative Study of the Adsorption of Phenol and Salicylic Acid from Aqueous Solution Onto Nonionic Polymeric Resins, *Separation and Purification Technology*, **45**, p. 86 (2005).

[3] Deosarkar. S.P., Pangarkar V.G., Adsorptive Separtion and Recovery of Organics from PHBA and SA Plant Effluents, *Separation and Purification Technology*, **38**, p. 241 (2004).

[4] Gusler G.M, Browne T.E, Cohen Y, Sorption of Organics from Aqueous Solution onto Polymeric Resins, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **32**, p. 2727 (1993).

[5] Raymond, R. L., Jamison, V. W., and Hudson, J. 0, Microbial Hydrocarbon Co-oxidation II. Use of Ion-Exchange Resins, *American Society for Microbiology*, **17** (4) (1969).

[6] Parvinpour, A., Prediction of Different Adsorption Behavior of Samples of Activated Carbons and Carbon Molecular Sieves by Different Adsorption Models, *M.S.Thesis,Iran university of Since and Technology*, (2002).

[7] Khachane, P.K, Heesink, A.B.M, Versteeg G.F, Pangarkar V.G., Adsorptive Separation and Recovery of Organic Compounds from Purified Terephthalic Acid Plant Effluent, *Sep. Sci. Tech.*, **38** (1), p. 93 (2003).

[8] Browne T.E., Cohen Y., Aqueous-Phase Adsorption of Trichloroethylene and Chloroform onto Polymeric Resins and Activated Carbon, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **29**, p. 1338 (1990).

[9] Cairo, P.R., Coyle, J.T., Davis, J.T., Neukrug, H.M, Suffet, I.H, Wickl, A, Evaluating Regenerated Activated Carbon Through Laboratory and Pilot-Column Studies, *J. Am. Water Works Assoc.*, **74** (2), p. 94 (1982).

[10] Grant, T.M, King, C.J, Mechanism of Irreversible Adsorption of Phenolic Compounds by Actiated Carbon, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **29**, p. 264 (1990).

[11] Nobuhiro Kanazawa, Kohei Urano, Naohiro Kokado, and Yoshikuni Urushigawa, Adsorption Equilibrium Equation of Carboxylic Acids on Anion-Exchange Resins in Water, *J. Colloid and Interface Science*, **238**, p. 196 (2001).

[12] Jia-Ming Chern, Yi-Wen Chien, Competitive Adsorption of Benzoic Acid and Pnitrophenol onto Activated Carbon: Isotherm and Breakthrough Curves, *Water Research*, **37**, p. 2347 (2003).

[13] Bingcai Pan, Xinqing Chen, Bingjun Pan, Weiming Zhang, Prepration of an Aminated Macroreticular Resin Adsorbent and Its Adsorption of p-Nitrophenol from Water, *J. Hazarous Materials*, **B137**, p. 1236 (2006).

[14] Deosarkar, S.P., Pangarkar, V.G, Adsorptive Separation and Recovery of Organics from PHBA and SA Plants Effluents, *Sep. Purif. Technol.*, **38** (3), p. 241 (2004).

[15] Crook, E.H., McDonell, R.P, McNulty, J.T., Removal and Recovery of Phenols from Industrial Waste Effluents with Amberlite Polymeric Adsorbents, *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, **14**, p. 113 (1975).

[16] Farrier, D.S., Hines, A.L., Wang, S.E., Adsorption of Phenol and Benzoic Acid from Dilute Aqueous Solution Onto A Macroretikular Resin, *J. Colloid Interface Sci.*, **69**, p. 233 (1979).

[17] Gusler, G.M., Browne, T.E., Cohen, Y., Sorption of Organics from Aqueous Solution onto Polymeric resins, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **32**, p. 2727 (1993).

[18] Jia-Ming Chern,Yi-Wen Chien, Adsorption Isotherms of Benzoic Acid onto Activated Carbon and Breakthrough Curves in Fixed-Bed Columns, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**, p. 3775 (2001).

[19] Dinsdale, R. M.; Hawkes, F. R.; Hawkes, D. L. Anaerobic Digestion of Short Chain Organic Acids in an Expanded Granular Sludge Bed Reactor, *Water Res.*, **34**, p. 2433 (2000).

[20] Levan, M. D., Carta, G., Yon, C.M.,"Adsorption and ion-exchange, "In Perry's Chemical Engineers Handbook", 7th ed. Perry R.H.,GreenD. W., aloney, J. O., Eds.:McGraw-Hill: New York (1997).

[21] Jozesef, Toth, "Uniform and Thermodynamically Consistent Interpretation of Applied Chemistry", University of Miskolc, Miskolc-Egytem Varos, Hungry.

[22] Motoyuki, Suzuki, "Adsorption Engineering", Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo 1, (1990)