Archive of SID

تأثیر مواد فعال سطحی بر هیدرودینامیک و انتقال جرم در بیورآکتور هواراند آکنده

مصطفی کشاورز مروجی* و بهارک سجادی
دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۹

چکیده

در این مقاله اثر حضور مواد فعال سطحی بر پارامترهای هیدرودینامیک و مشخصه انتقال جرم در یک بیورآکتور هواراند با گردش داخلی استوانه‌ای با بستر آکنده بررسی شده است. ماندگی کلی گاز، سرعت گردش مایع و زمان اختلاط به‌عنوان پارامترهای هیدرودینامیکی و ضریب حجمی انتقال جرم اکسیژن به‌عنوان مشخصه انتقال جرم در نظر گرفته شده است. برای پرکردن بستر بیورآکتور، ۲۵ آکنه استوانه‌ای با فواصل منظم در کنار یکدیگر قرار داده شده است. کلیه آزمایش‌ها در سیستم هوا و آب حاوی دو نوع ماده فعال سطحی کاتیونی و غیر یونی با غلظت ppm ۵، با سرعت هوادهی در محدوده ۰/۱۹ تا cm/s ۰/۹۷ و در شرایط محیطی (فشار اتمسفریک و دمای °C ۲۵) انجام شده است. در بیورآکتور هواراند با بستر آکنده نسبت به حالت بدون آکنه، سرعت گردش مایع، ماندگی کلی گاز و ضریب حجمی انتقال جرم اکسیژن کاهش و زمان اختلاط افزایش می‌یابد. در سیستم حاوی مواد فعال سطحی قطر حباب‌ها حدود ۳۰٪ کاهش پیدا کرده و تقریبا یکسان می‌شوند. لذا، با تحلیل نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد که در حضور مواد فعال سطحی، ماندگی گاز و زمان اختلاط افزایش و سرعت گردش مایع و ضریب حجمی انتقال جرم کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: بیورآکتور هواراند، مواد فعال سطحی، هیدرودینامیک، انتقال جرم و آکنه

مقدمه

در سال‌های اخیر بیورآکتورهای هواراند در صنعت و تحقیقات، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این توجه به خاطر مشخصات اختلاط عالی، سرعت گردش مایع خوب و کاربرد گسترده آنها در صنعت به‌خصوص در تولید ترکیبات با پایه بیولوژیکی (مانند اسیدهای ارگانیک، گلایکول‌ها، آمین‌ها، الکل‌ها، آلکالوئیدها و پروتئین‌ها و ...) و همچنین کاربرد آنها در پاک‌سازی خاک‌های آلوده به نفت و تصفیه هوازی آب‌های آلوده می‌باشد. در مقایسه با برج‌های حبابی و مخازن اختلاط، طراحی مکانیکی نسبتا ساده‌تر، تنش برش کم‌تر، ظرفیت بالا، اختلاط خوب، عدم حضور همزن مکانیکی و در نتیجه مصرف پایین انرژی، افزایش مقیاس آسان و قیمت پایین در این رآکتورها باعث افزایش کاربرد آنها در صنایع بیوشیمیایی شده است [۱ و ۲].

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی moraveji@aut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

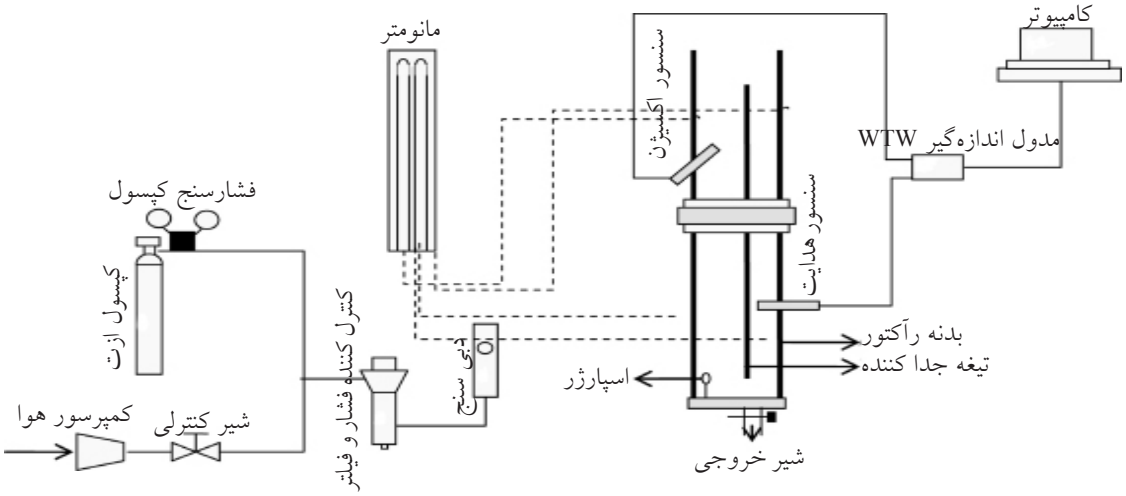
در تحقیقات مختلفی که در زمینه هیدرودینامیک بیورآکتورهای هواراند انجام شده این نتیجه به‌دست آمده است که با افزایش سرعت ظاهری گاز، ماندگی گاز در مایع و سرعت گردش افزایش پیدا می‌کند. مهرنیا و همکارانش [۳] دریافتند که در یک رآکتور هواراند دارای لوله داخلی، ضریب انتقال جرم به‌طور غیرمستقیم به ویسکوزیته سینماتیک بستگی دارد. کوید و همکارانش [٤] تاثیر ویسکوزیته (در محدوده ۰/۹ تا ۱۳ pa.s) در یک بیورآکتور هواراند دارای لوله داخلی را به‌صورت یک پارامتر بی بعد گزارش کرده‌اند. اوزرگین [۵] برای افزایش ویسکوزیته از گلیسیرول استفاده نموده و تاثیر افزایش ویسکوزیته را بر ضریب انتقال جرم بررسی کرده است. در زمینه اضافه کردن مواد فعال سطحی، مطالعات نشان می‌دهد که افزودن مواد فعال سطحی باعث کاهش قطر حباب‌ها و افزایش ماندگی گاز در مایع می‌شود. مطالعه روی تاثیر اضافه کردن مواد فعال سطحی بر مشخصات عملیاتی بیورآکتورهای هواراند، زمینه‌ای است که کمتر به آن توجه شده است. مروجی و همکارانش [٦] اثر انواع مواد فعال سطحی را بر پارامترهای هیدرودینامیکی و ضریب انتقال جرم بررسی کرده و نشان داده‌اند که مواد فعال سطحی به‌طور مؤثر بر این پارامترها تاثیر می‌گذارد.

هدف اصلی این تحقیق بررسی تجربی اثر حضور مواد فعال سطحی بر هیدرودینامیک و انتقال جرم بین فازی گاز- مایع در بیورآکتور هواراند با بستر آکنده است. ماندگی گاز در مایع، سرعت گردش مایع و زمان اختلاط به‌عنوان پارامترهای هیدرودینامیک جریان و ضریب انتقال جرم حجمی گاز- مایع به‌عنوان پارامتر انتقال جرم اندازه‌گیری می‌شود.

تجهیزات و مواد

در این تحقیق از یک بیورآکتور هواراند استوانه‌ای با گردش داخلی استفاده شده است که نمایی از آن در شکل ۱ نشان داده شده است. بیورآکتور از جنس شیشه پیرکس با ارتفاع ۱/۳ m و قطر داخلی ۰/۱۳٦ m می‌باشد. این بیورآکتور با یک تیغه جداکننده (ارتفاع ۱ m، عرض ۰/۱۲۹ m و ضخامت ۰/۰۰۵ m) به‌دو ناحیه بالارونده و پایین‌رونده (ناودان) با نسبت سطح مقطع بالارونده به ناودان برابر با ۲/۱۳٦، تقسیم شده است. تیغه جداکننده به فاصله ۱۰ cm از انتهای بیورآکتور قرار دارد. یک سرامیک متخلخل به قطر ۲ cm به‌عنوان اسپارژر استفاده شده است.

سرعت ورود هوا توسط یک شیر کنترلی و روتامتر تنظیم و تثبیت می‌شود. از ۲۵ آکنه استوانه‌ای با طولی برابر با قطر داخلی بیورآکتور (۰/۱۳٦ m) و قطر ۰/۰٤ m که با فواصل منظم قرار گرفته‌اند، برای پر کردن بستر بالارونده بیورآکتور استفاده شده است. جزئیات بیورآکتور در جدول ۱ ارائه شده است. ارتفاع اولیه مایع در بیورآکتور قبل از هوادهی ۱/۲۳ m است. کلیه آزمایش‌ها در شرایط محیطی (فشار اتمسفریک و دمای ۲۵ °C) انجام شده است.



شکل ۱- بیورآکتور هواراند با گردش داخلی مورد استفاده در این پژوهش

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- جزئیات مربوط به بیورآکتور

شرح	مقدار
قطر رآکتور هواراند (m)	۰/۱۳۶
قطر تیغه جداکننده (m)	۰/۱۲۹
ارتفاع جداکننده (m)	۰/۱۰۱
ارتفاع بیورآکتور (m)	۰/۱۵۰
ارتفاع مایع (m)	۰/۱۱۷۵
نسبت سطح بالارونده به ناودان	۲/۱۳۶
سطح مقطع بالارونده (cm^2)	۸۶/۱۱۵۵
سطح مقطع ناودان (cm^2)	۴۰/۲۹۹
ارتفاع تیغه جداکننده از سطح تحتانی رآکتور (m)	۰/۰۱۱۵
طول آکنه (m)	۰/۰۱۱۵
قطرآکنه (m)	۰/۰۴
تعداد آکنه‌ها	۲۵

مواد فعال سطحی (کاتیونی و غیریونی) به‌میزان ۵ ppm استفاده شده که مشخصات این مواد فعال سطحی در جدول ۲ آمده است.

روش‌های اندازه‌گیری

قطر حباب‌ها

برای اندازه‌گیری قطر حباب‌ها از تکنیک عکس‌برداری با یک دوربین دیجیتال (CANON S51S با رزولوشن ۸ مگاپیکسل) که در ارتفاع ۰/۶ متری از کف پایین بیورآکتور قرار گرفته، استفاده شده است [۷]. سیصد حباب به‌طور تصادفی از ده عکس گرفته شده با استفاده از روش متوسط‌گیری حرکتی انتخاب گردیده و قطر متوسط حباب‌ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} d_i^3}{\sum_{i=1}^{i=N} d_i^2} \quad (۱)$$

d_{ave} متوسط قطر حباب‌ها، d_i قطر هر حباب و i تعداد حباب‌ها از ۱ تا N می‌باشد.

ماندگی گاز در مایع

ماندگی گاز در مایع در این تحقیق از طریق محاسبه اختلاف فشار بین دو نقطه متفاوت در بالارونده و ناودان (به‌طور جداگانه) اندازه گرفته شده است. برای تعیین اختلاف فشار از مانومتر استفاده شده است. متوسط ماندگی گاز در مایع در هر ناحیه با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\varepsilon = \frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_G} \frac{dh_M}{dz} \quad (۲)$$

ρ_L دانسیته مایع، ρ_G دانسیته گاز، dh_M اختلاف نشان داده شده در مانومتر و dz اختلاف ارتفاع عمودی مکان‌های قرارگیری مانومتر می‌باشد.

سرعت گردش مایع و زمان اختلاط

سرعت گردش مایع با استفاده از تست ردیاب اندازه‌گیری شده است [۷]. یک سنسور سنجش هدایت به فاصله ۱۰ cm از پایین ناودان قرار داده شده است.

جدول ۲- ویژگی‌های مربوط به انواع مواد فعال سطحی مورد استفاده

ماده فعال سطحی	Tween 40	Triton X-405	Brij 58	HCTBR
نام شیمیایی	POLYSORBATE 40	Polyethylene Glycol Octylphenyl Ether	Polyoxyethylene (20) Cetyl Ether	Ammonium, Hexadecyltrimethyl-, Bromide
فرمول شیمیایی	$C_{62}H_{122}O_{26}$	$C_{94}H_{182}O_{41}$	$C_{16}H_{33}(OCH_2CH_2)_{20}OH$	$C_{19}H_{42}BrN$
وزن مولکولی	1283.84 g/mol	1968.47 g/mol	1123.52 g/mol	364.45 g/mol
ظاهر	مایع شیری رنگ ویسکوز	مایع شفاف ویسکوز	دانه‌های جامد سفید رنگ	پودر جامد سفید رنگ
نوع	غیریونی	غیریونی	غیریونی	کاتیونی

www.SID.ir

Archive of SID

از ml ۲۵ محلول ۳ مولار کلریدسدیم به‌عنوان ردیاب استفاده شده است. پس از اینکه سرعت ورود هوا دریک مقدار مطلوب تثبیت شد و شرایط رآکتور به حالت پایدار رسید، ردیاب به‌صورت ناگهانی به بالای ناودان تزریق شده و سیگنال آن ثبت می‌شود، تا ردیاب به‌طور کامل در بیورآکتور پخش شود و هدایت آب درون بیورآکتور به یک میزان ثابت برسد. از فاصله زمانی بین اولین دو پیک متوالی، سرعت گردش مایع محاسبه می‌شود [۲]:

$$U_L = \frac{2h_R}{t_c} \qquad (۳)$$

h_R ارتفاع رآکتور و t_c فاصله زمانی بین دو پیک متوالی می‌باشد. زمان اختلاط، فاصله بین اولین پیک و مکانی می‌باشد که غلظت ردیاب به ۹۵٪ غلظت نهایی می‌رسد.

ضریب انتقال جرم حجمی گاز- مایع

ضریب انتقال جرم حجمی اکسیژن (k_La_L) با استفاده از عریان‌سازی محتوای رآکتور از اکسیژن و سپس اکسیژن‌دهی اندازه‌گیری می‌شود. در این روش ابتدا با نیتروژن‌دهی به مایع درون بیورآکتور، اکسیژن از محیط مورد نظر خارج می‌شود. بعد از عاری شدن محیط از اکسیژن، تزریق نیتروژن به بیورآکتور متوقف شده و بعد از اطمینان از اینکه تمامی حباب-های نیتروژن از بیورآکتور خارج شدند، هوا به سرعت به بیورآکتور تزریق و غلظت اکسیژن محلول در مایع بر حسب زمان ثبت می‌شود. تزریق هوا به بیورآکتور ادامه می‌یابد تا میزان اکسیژن به غلظت پایدار برسد. اکسیژن محلول در فاز مایع توسط یک سنسور اندازه‌گیری اکسیژن (ساخت شرکت WTW مدل Cell325) که به فاصله ۱۰ cm پایین‌تر از سطح مایع قرارگرفته شده است اندازه‌گیری می‌شود [٦]. برای جلوگیری از تجمع حباب‌های اکسیژن در نزدیکی سنسور که منجر به ایجاد خطا در ثبت میزان اکسیژن محلول می‌گردد، این الکترود با زاویه ۳۰ درجه نسبت به محور عمودی بیورآکتور در مسیر جریان قرار داده شده است.

ضریب انتقال جرم حجمی اکسیژن با استفاده از انتگرال‌گیری از معادله ۳ به دست می‌آید:

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a_L (C_L^* - C_L) \qquad (٤)$$

با انتگرال‌گیری از معادله ٤ و اعمال شرط مرزی $C_L = 0$ در زمان $t = 0$، معادله ۵ به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\ln\left(\frac{C^* - C_L}{C^* - C_0}\right) = -k_L a_L t \qquad (۵)$$

C_L غلظت اکسیژن در زمان t، C^* غلظت اشباع اکسیژن محلول در زمان ثابت شدن محتوی اکسیژن محلول در بیورآکتور، k_L نرخ انتقال جرم فیلم مایع و a سطح تماس ویژه بین فازها می‌باشد. با رسم جمله سمت راست معادله ٤ بر حسب زمان و محاسبه شیب نمودار، ضریب حجمی انتقال جرم (k_La_L) به‌دست می‌آید.

بحث و نتایج

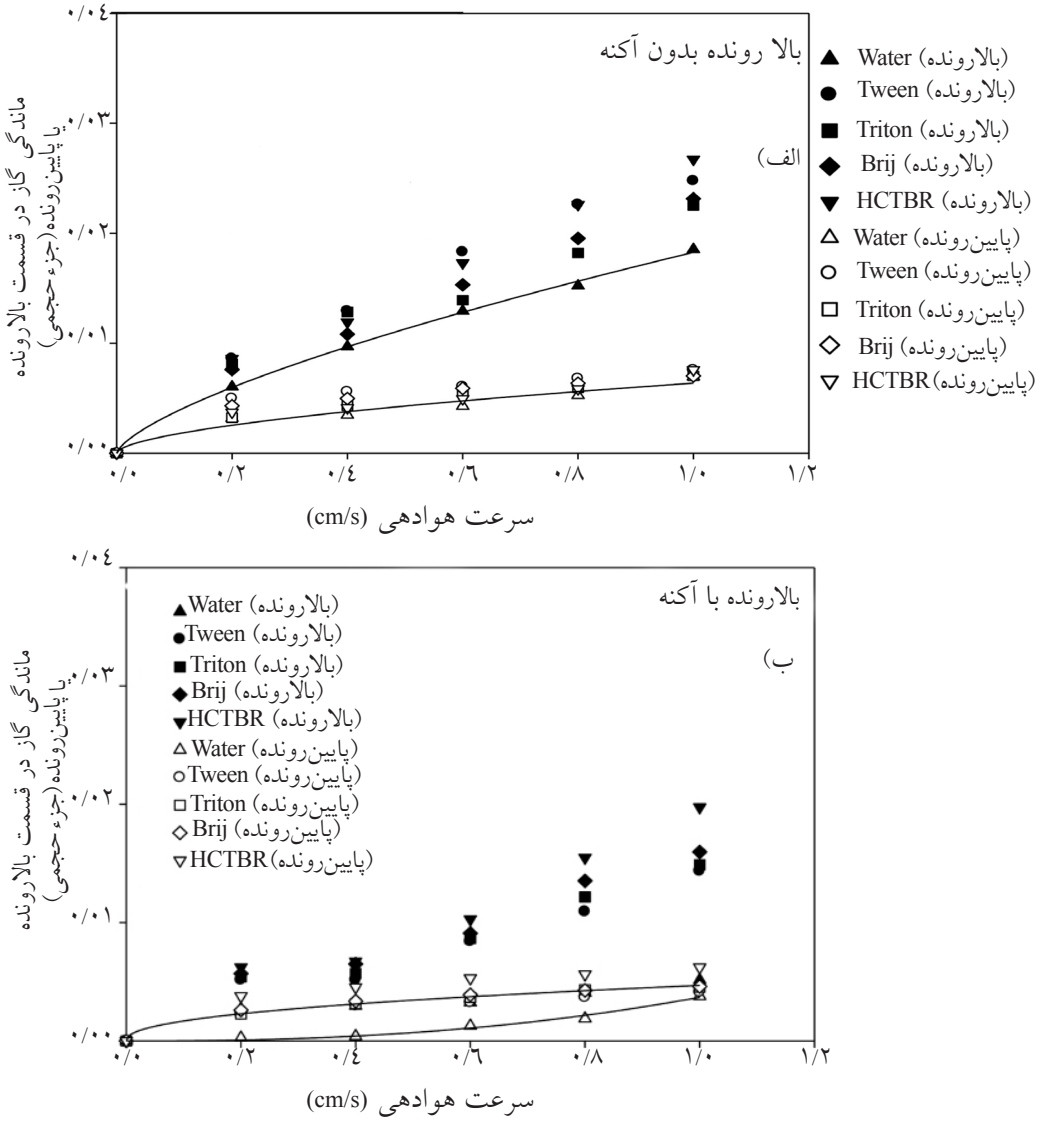
ماندگی گاز در مایع

تاثیرافزودن مواد فعال سطحی بر ماندگی گاز در مایع بیورآکتور با بستر آکنده بر حسب سرعت ظاهری گاز و مقایسه آن با حالت بدون آکنه در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزودن سرعت گاز، کسر حجمی گاز در مایع افزایش و به تبع آن ماندگی گاز در مایع در بالارونده افزایش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش سرعت ورود گاز، تعداد حباب‌های گاز که وارد ناودان می‌شود نیز بیشتر شده و ماندگی گاز در مایع در ناودان افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که شیب این افزایش در بالارونده بیش از ناودان است. این نتیجه در تطابق با سایر تحقیقات انجام گرفته می‌باشد [٦].

در بیورآکتور هواراند با بستر آکنده، حباب‌های گاز با برخورد به آکنه‌ها مدت زمانی کوتاهی متوقف می‌شوند در حین این توقف، حباب‌های دیگر به آنها برخورد کرده و ضمن این برخورد، حباب‌ها به یکدیگر پیوسته و قطر آنها افزایش می‌یابد. بنابراین نیروی شناوری وارد بر حباب‌ها افزایش یافته و این حباب‌ها با سرعت بیشتری خود را به بالای بیورآکتور می‌رسانند و بدون ورود به ناودان از بالای بیورآکتور خارج می‌شوند. در نتیجه در سیستم با بستر آکنده، ماندگی گاز کمتر از حالت بدون آکنه است. در سیستم‌های حاوی آب خالص، حباب‌ها معمولا هم‌اندازه نیستند و از طرفی با صعود حباب‌ها در بیورآکتور و ملحق شدنشان به یکدیگر، قطر آنها افزایش می‌یابد اما در سیستم‌های حاوی مواد فعال سطحی، حباب‌ها تقریبا هم‌اندازه و کوچک هستند. ساردینگ و همکارانش [۸] مواد فعال سطحی متفاوت را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که اضافه کردن مواد فعال سطحی باعث کاهش حدود ۳۰٪ قطر متوسط حباب‌ها می‌گردد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲- ماندگی گاز در مایع در قسمت‌های بالارونده و ناودان در بیورآکتور هواراند با آکنه و بدون آکنه (علامت‌های تو پر مربوط به بستر آکنده و توخالی مربوط به بستر بدون آکنه هستند.)

لذا با کاهش قطر حباب‌ها، کسر حجمی گاز درمایع در بالارونده و ناودان افزایش می‌یابد.

عملکرد مواد فعال سطحی مختلف بر ماندگی کلی گاز در قسمت‌های مختلف بیورآکتو را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

قسمت بالارونده:

بدون آکنه HCTBR = Tween > Brij = Triton

بستر آکنده HCTBR > Brij > Triton > Tween

قسمت ناودان:

بدون آکنه Tween > Brij > HCTBR = Triton

بستر آکنده HCTBR >> Brij > Triton >Tween

بنابراین، ماده فعال سطحی کاتیونی HCTBR تاثیرگذارترین ماده بر ماندگی گاز است. شاید تاثیر بیشتر این ماده به دلیل خواص شیمیایی متفاوت آن و کاهش اثر پدیده مارانگونی[1] در حضور این ماده باشد که باعث می‌شود از صلب بودن حباب‌ها کاسته شده و نیروی دراگ کمتری را احساس کنند. در نتیجه موجب می‌شود. نیروی شناوری وارد بر حباب‌ها به سمت بالا سهم بیشتری دربرآیند نیروهای وارد بر حباب داشته باشد.

1. Marangoni Effect

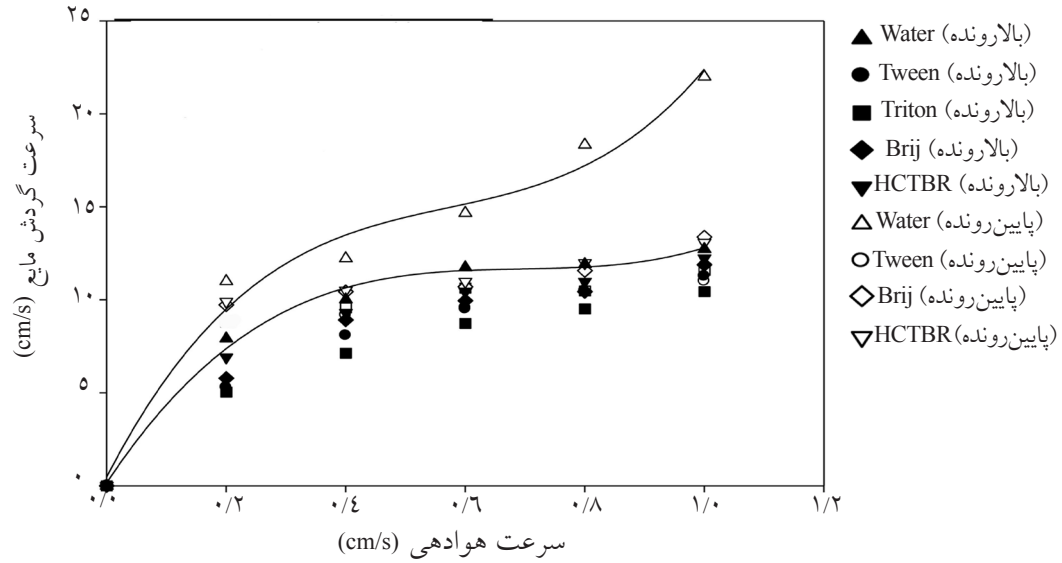
www.SID.ir

Archive of SID

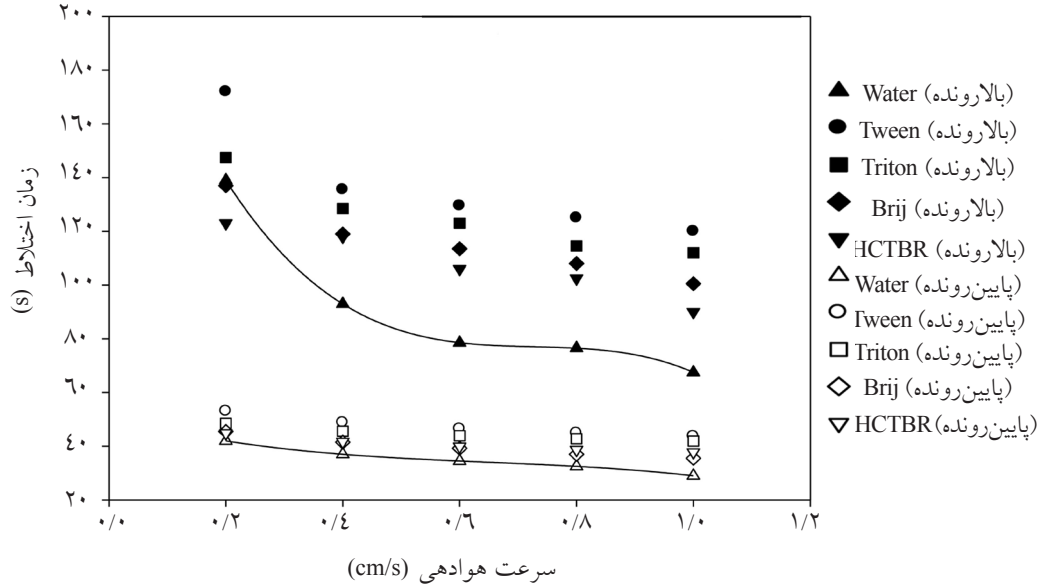
سرعت گردش مایع و زمان اختلاط

اثر بستر آکنده روی سرعت گردش مایع در بیورآکتور و زمان اختلاط بر حسب سرعت گاز ورودی و مقایسه آن با حالت بدون آکنه به ترتیب در شکل‌های ۳ و ٤ نشان داده شده است.

در بیورآکتورهای هواراند اختلاف دانسیته بین بالارونده و ناودان، نیروی محرکه برای حرکت و گردش مایع، می‌باشد. با افزایش سرعت گاز ورودی، اختلاف بین کسر حجمی گاز در بالارونده و ناودان افزایش می‌یابد لذا سرعت گردش مایع افزایش و زمان اختلاط کاهش می‌یابد [۷].



شکل ۳- سرعت گردش مایع در بیورآکتور هواراند با آکنه و بدون آکنه (علامت‌های تو پر مربوط به بستر آکنده و توخالی مربوط به بستر بدون آکنه هستند.)



شکل ٤- زمان اختلاط در بیورآکتور هواراند با آکنه و بدون آکنه (علامت‌های تو پر مربوط به بستر آکنده و توخالی مربوط به بستر بدون آکنه می‌باشد).

www.SID.ir

Archive of SID

در سیستم‌های بیورآکتور هواراند با بستر آکنده، دو عامل باعث کاهش سرعت گردش مایع می‌شود. در ابتدا، با برخورد مایع و حباب‌های گاز به آکنه‌ها توقف کوتاهی ایجاد می‌گردد که باعث کاهش سرعت حرکت می‌شود. از طرف دیگر، پس از برخورد حباب‌های گاز و مایع به آکنه‌ها و تغییر جهت حرکت، مسافتی که باید پیموده شود، افزایش می‌یابد. بنابراین، سرعت گردش کاهش و زمان اختلاط افزایش می‌یابد.

همان‌گونه که پیشتر عنوان شد، در سیستم‌های حاوی مواد فعال سطحی، حباب‌ها هم‌اندازه و کوچک‌تر هستند که منجر به افزایش ماندگی گاز در هر دو ناحیه بالارونده و ناودان می‌شود. اما اختلاف دانسیته محلول بین این دو ناحیه کمتر است که منجر به کاهش سرعت گردش مایع و افزایش زمان اختلاط در بیورآکتور می‌شود. عملکرد مواد فعال سطحی بر سرعت گردش مایع در بیورآکتور با بستر آکنده و مقایسه آن با حالت بدون آکنه به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

بستر آکنده HCTBR = Brij > Tween = Triton

بستر بدون آکنه HCTBR > Brij > Tween > Triton

از آنجایی‌که زمان اختلاط توسط سرعت گردش مایع کنترل می‌شود، تاثیر مواد فعال سطحی بر زمان اختلاط، تابع سرعت گردش مایع می‌باشد [۲]. در بیورآکتور با بستر آکنده و مقایسه آن با حالت بدون آکنه تغییرات زمان اختلاط به‌صورت زیر است:

بستر آکنده Tween > Triton > Brij > HCTBR

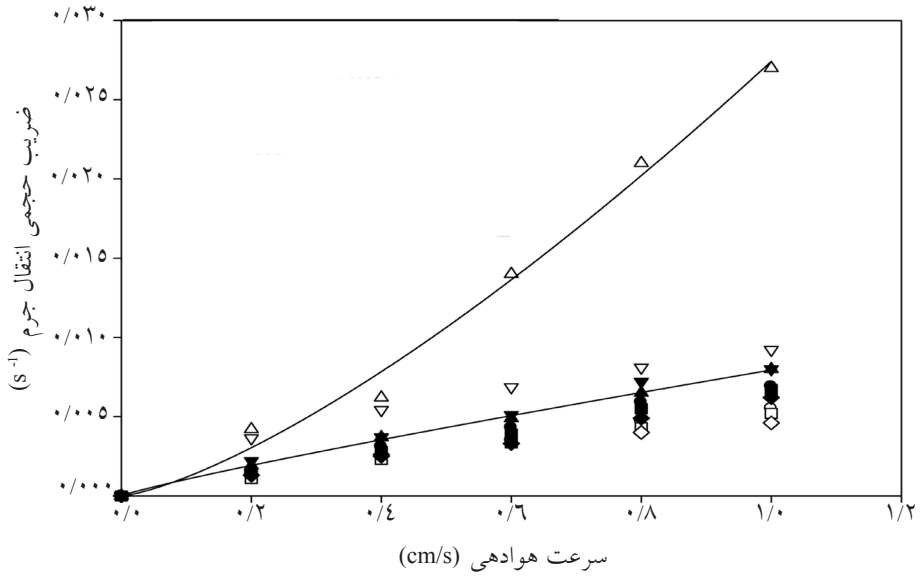
بستر بدون آکنه Tween > Triton > Brij = HCTBR

بنابراین، ماده فعال سطحی کاتیونی HCTBR تاثیر گذارترین ماده بر سرعت گردش مایع بوده و کمترین زمان اختلاط را دارد.

ضریب انتقال جرم حجمی اکسیژن

اثر حضور مواد فعال سطحی بر ضریب انتقال جرم حجمی اکسیژن بر حسب سرعت گاز ورودی برای بیورآکتور با بستر آکنده و مقایسه آن با حالت بدون آکنه در شکل ۵ رسم شده است.

با افزایش سرعت ظاهری گاز، کسرحجمی گاز در مایع افزایش می‌یابد که منجر به افزایش نرخ انتقال جرم می‌شود. ضریب انتقال جرم برای آب خالص به‌طور مؤثرتری در مقایسه با حضور مواد فعال سطحی برای تمامی سرعت‌های هوادهی بیشتر است. در سرعت‌های پایین هوادهی، مواد فعال سطحی اثر کمتری روی افزایش ضریب انتقال جرم دارد. ولی در سرعت‌های بالاتر گاز ورودی، این اثر بیشتر است. حضور مواد فعال سطحی در سطوح حباب‌ها به‌دلیل اصلاح ترکیب یا ضخامت لایه فیلم اطراف حباب‌های هوا، بر انتقال جرم تاثیر می‌گذارد.



شکل ۵- ضریب حجمی انتقال جرم در بیورآکتور هواراند با آکنه و بدون آکنه (علامت‌های تو پر مربوط به بستر آکنده و توخالی مربوط به بستر بدون آکنه می‌باشد).

www.SID.ir

Archive of SID

مواد فعال سطحی سطوح تماس مایع-گاز را می‌پوشاند و یک لایه سخت ایجاد می‌کند که به‌علت مکانیسم‌های مختلف از جمله کاهش اغتشاش سطحی [۹ و ۱۰] و نفوذ آهسته [۸] باعث کاهش ضریب نفوذ اکسیژن می‌گردد.

می‌توان از دیدگاه دیگری بالاتر بودن ضریب حجمی انتقال جرم در آب خالص نسبت به محلول همراه با حضور مواد فعال سطحی را تفسیر کرد. این اختلاف به‌علت سطح کاملا متحرک در سیستم آب خالص است که در آن تجدید سطح بیشتر از سیستم حاوی مواد فعال سطحی می‌باشد. در سیستم حاوی مواد فعال سطحی به‌دلیل اینکه مولکول این مواد دارای یک سر آب‌گریز و یک سر آب‌دوست است، تمایل دارد روی سطح قرار گیرد. بنابراین نرخ تجدید سطح به‌علت اثر مارانگونی کاهش می‌یابد. این پدیده باعث کاهش نرخ انتقال جرم گاز- مایع می‌شود که میزان این کاهش با توجه به نوع ماده فعال سطحی متفاوت می‌باشد.

در بیورآکتور هواراند، به‌هم‌آمیختگی و ترکیدن حباب‌ها دو پدیده‌ای است که تحت تاثیر الگوی رژیم جریان اتفاق می‌افتد. در جریان آشفته نیروهای نامنظم و نابرابر در جهت‌های مختلف به پوسته حباب وارد می‌شود که باعث کشیده شدن پوسته و ترکیدن حباب‌ها و درنتیجه کاهش قطر حباب و افزایش نرخ انتقال جرم می‌شود. با قرار دادن آکنه‌ها با فواصل منظم در بیورآکتور، الگوی جریان آرام لایه‌ای بیش از جریان آشفته تقویت می‌شود. بنابراین، به‌هم‌آمیختگی حباب‌ها بیش از ترکیدن حباب‌ها روی می‌دهد که باعث افزایش اندازه حباب‌ها و کاهش نرخ انتقال جرم می‌شود. با بررسی نتایج، ترتیب عملکرد و تاثیر مواد فعال سطحی بر ضریب حجمی انتقال جرم در بیورآکتور به‌صورت زیر گزارش می‌گردد:

بستر بدون آکنه HCTBR >> Brij = Tween = Triton

بستر آکنده HCTBR > Tween > Triton > Brij

بنابراین، ماده فعال سطحی کاتیونی HCTBR تاثیر گذارترین ماده بر نرخ انتقال جرم می‌باشد.

بر مبنای نتایج تجربی به‌دست آمده در این تحقیق، ضریب حجمی انتقال جرم در حضور مواد فعال سطحی برای سرعت‌های هوادهی از ۰/۱۹ تا ۰/۹۷cm/s در محدوده ۰/۰۰۱۱ تا s^{-1} ۰/۰۰۸٤ تغییر می‌کند. بای و همکاران [۱۱] ضریب حجمی انتقال جرم در دامنه هوادهی ۰/۰۰۳ تا m/s ۰/۰۲۵ را در محدوده ۰/۰۰۲۵ تا s^{-1} ۰/۰۲۸ گزارش کرده‌اند. ساردینگ و همکاران [۸] این ضریب را برای برج حبابی در حضور مواد فعال سطحی در محدوده سرعت هوادهی ۰/۰۰۰۱۵ تا m/s ۰/۰۰۲ در دامنه بین ۰/۰۰۰۳۳ تا s^{-1} ۰/۰۰٦۲ به‌دست آورده‌اند. اصغرپور و همکارانش [۱۲] ضریب حجمی انتقال جرم را برای برج حبابی و محلول هیدروکربن- آب در محدوده سرعت هوادهی بین ۰/۱ تا cm/s ۲/۳٦ در دامنه بین ۰/۰۰۲۳ تا s^{-1} ۰/۰۳۱۵ گزارش کرده‌اند.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- با افزایش سرعت ورودی گاز، سرعت گردش مایع، ماندگی گاز در مایع و ضریب حجمی انتقال جرم افزایش و زمان اختلاط کاهش می‌یابد.

۲- در بیورآکتور هواراند همراه با آکنه (نسبت به سیستم بدون آکنه)، با افزایش سرعت گاز، نرخ افزایش سرعت گردش مایع، ماندگی گاز در مایع و ضریب حجمی انتقال جرم کاهش می‌یابد.

۳- با افزودن مواد فعال سطحی به آب درون رآکتور، قطر حباب‌ها تقریبا یکسان و کوچک می‌شود. بنابراین، کسر حجمی گاز در مایع افزایش پیدا می‌کند. در این حالت به‌دلیل کاهش اختلاف دانسیته بین بالارونده و ناودان، سرعت گردش مایع کاهش و زمان اختلاط افزایش می‌یابد. همچنین نرخ افزایش ضریب حجمی انتقال جرم نسبت به سیستم حاوی آب خالص کاهش می‌یابد.

٤- در میان مواد فعال سطحی، HCTBR که از نوع کاتیونی می‌باشد، در ۷۵٪ موارد بیشترین اثر را داشته و در بین غیریونی‌ها، اثر Tween و Brij تقریبا یکسان و بیش از Triton می‌باشد.

علائم و نشانه‌ها

C_L: غلظت اکسیژن حل شده د ر زمان t (kg/m^3)

C_o: غلظت اولیه اکسیژن حل شده $(t=0)$، (kg/m^3)

www.SID.ir

Archive of SID

C^*: غلظت اشباع اکسیژن حل شده (kg/m^3)

d_{ave}: قطر متوسط حباب‌ها (mm)

dz: فاصله بین مکان های قرار گرفتن مانومتر (m)

h_R: ارتفاع مایع و گاز درون رآکتور (m)

k_L: نرخ انتقال جرم فیلم مایع (m/s)

k_La: ضریب حجمی انتقال جرم گاز- مایع (s^{-1})

t: زمان (s)

t_c: فاصله زمانی بین دو پیک مجاور درسیگنال‌های ردیاب (s)

U_G: سرعت ظاهری هوادهی به مایع در منطقه بالارونده (m/s)

U_L: متوسط سرعت گردش مایع در رآکتور بالارونده و ناودان (m/s)

نمادهای یونانی

ε_d: متوسط ماندگی گاز در ناودان

ε_r: متوسط ماندگی گاز در بالارونده

ρ_G: دانسیته هوا (kg/m^3)

ρ_L: دانسیته مایع (kg/m^3)

مراجع

[۱] کشاورز مروجی م.، قادری ع.، مروتی پسند م.، وثوقی م.، بررسی انواع زیست رآکتورهای هواراند و پارامترهای هیدرودینامیکی مؤثر بر آنها، مجله مهندسی شیمی ایران، دوره ۹، شماره ۵۱، ۲۶-۱۳، ۱۳۸۹.

[2]. Chisti M. Y., *Airlift Bioreactors*, Elsevier, London, 1989.

[3]. Mehrnia M. R., Towfighi J. and Bonakdarpour B., "*Gas hold up and Oxygen transfer in a draft-tube air lift bio-reactor with petroleum-based liquids*", Biochemical Engineering Journal, Vol. 22, pp. 105–110, 2005.

[4]. Koide K., Sato H. and Iwamoto S., "*Gas hold up and volumetric liquid-phase mass transfer coefficient in bubble column with draught tube and with gas dispersion in to annulus*", J. Chem. Eng. Jpn., Vol. 16, No. 5, pp. 413–419, 1983.

[5]. Ozergin k., *Studied on ethanol production by fermentation*, M.Sc. Thesis. Bogazici university, 1989.

[6]. Moraveji M. K., Morovati Pasand M., Davarnejad R. and Chisti Y., "*Effects of surfactants on hydrodynamics and mass transfer in a split-cylinder airlift reactor*", Can. J. Chem., Vol. 33, No. 3, pp. 352-357, 2011.

[7]. Moraveji M. K., Sajjadi B. and Davarnejad R., "*Gas-liquid hydrodynamics and mass transfer in aqueous alcohol solutions in a split-cylinder airlift reactor*", Chemical Engineering & Technology, Vol. 34, No. 3, pp. 465–474, 2011.

[8]. Sardeing R., Painmanakul P. and Hébrard G. "*Effect of Surfactants on Liquid-Side Mass Transfer Coefficients in Gas-Liquid Systems: A First Step to Modelling*", Chem. Eng. Sci., 61, 6249-6260 (2006).

[9]. Alves S. S., Orvalho S. C. P. and Vasconcelos J. M. T., "Effect of bubble contamination on rise velocity mass transfer", Chemical Engineering Science 60, pp. 1–9, 2005.

[10]. Vazquez G., Cancela M. A., Riverol C., Alvarez E. and Navara J. M., "*Application of the Danckwerts method in a bubble column*", Effects of surfactants on mass transfer coefficient and interfacial area. Chemical Engineering Journal 78, pp. 13–19, 2000.

[11]. Bai F., L. Wang H., Huang J., Xu J., Caesar D., Ridgway T. and Gu and M., Moo-Young, "*Oxygen Mass-Transfer Performance of Low Viscosity Gas Liquid–Solid System in a Split-Cylinder Airlift Bioreactor*," Biotechnol. Lett. 23, 1109–1113, 2001.

[12]. Asgharpour M., Mehrnia M. R. and Mostoufi N., "*Effect of surface contaminants on oxygen transfer in bubble column reactors*", Biochemical Engineering Journal, Vol. 49, pp. 351-360, 2010.

www.SID.ir