

مقایسه‌ی عملکرد راکتور جریان افقی با بستر ثابت بی‌هوازی (HAIS)

و راکتور بستر لجن بی‌هوازی با جریان رو به بالا (UASB)

با استفاده از سوپستره سنتتیک

ایوب ترکیان (دانشیار)

انستیتو تحقیقات آب و انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

محمد مهدی امین (استادیار)

بیژن بینا (دانشیار)

حسین موحدیان (دانشیار)

گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان

در این مطالعه کارایی دو نوع راکتور بی‌هوازی، شامل UASB به‌عنوان فرایند رشد معلق و HAIS به‌عنوان فرایند رشد چسبیده، باهم مقایسه شد. آزمایشات بر روی سه راکتور در مقیاس آزمایشگاهی، شامل ۲ راکتور HAIS با حجم ۲ و ۳ لیتر و یک راکتور UASB با حجم ۳/۳ لیتر، انجام شد. در راکتور HAIS-PU از گرانول پلی‌یورتان (PU) با نسبت سطح به حجم (A/V) برابر $1100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ و راکتور HAIS-PE از فوم پلی اتیلن (PE) با نسبت سطح به حجم (A/V) برابر $1350 \text{ m}^2/\text{m}^3$ استفاده شد. از گرانول‌های لجن تصفیه‌کننده‌ی فاضلاب کشتارگاه با VSS برابر 25 g/l به‌عنوان بارورکننده، و از گلوکز همراه با مواد مغذی ضروری با COD برابر $1750 \pm 250 \text{ mg/l}$ به‌عنوان سوپستره استفاده شد. راهبری راکتورها در طی ۳۲۰ روز در دمای $30 \pm 2^\circ \text{C}$ در سه دوره‌ی ۱۰۰ روزه از بارگذاری‌های کمتر از $1 \text{ kgCOD}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ با میزان بیومس $11/5 - 12 \text{ kgVSS}/\text{m}^2$ آغاز شد. به‌منظور پی‌بردن به نحوه‌ی شکل‌گیری بیوفیلم در اطراف دانه‌های بستر نگه‌دارنده از مقاطع مختلف راکتورهای HAIS تصویربرداری CT-Scan انجام شد.

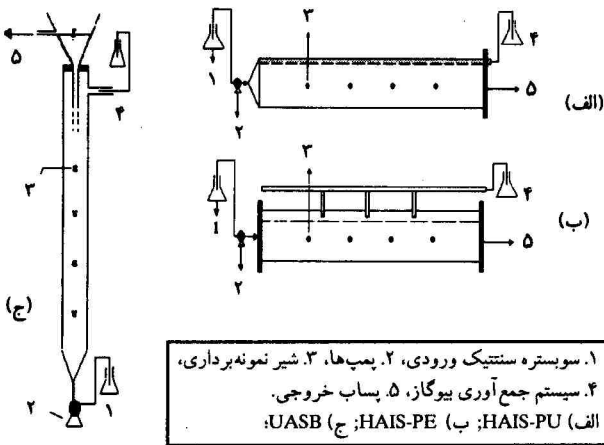
نتایج این مطالعه عملکرد مطلوب راکتور HAIS به‌منظور فراهم آوردن شرایط محیطی مناسب برای رشد و ماند بیومس در طول مدت زمان راه‌اندازی کوتاه مدت ۲۵ روزه را تایید کرد. در دوره بهره‌برداری مطلوب، بارگذاری راکتورها عبارت بود از: میزان بارگذاری آلی $1.3 \pm 0.6 \text{ gCOD}/\text{l} \cdot \text{d}$ و نسبت غذا به ریزاندامگان (F/M) برابر $0.12 \pm 0.03 \text{ gCOD}/\text{g VSS} \cdot \text{d}$ در راکتور UASB، میزان بارگذاری سطحی (SLR) برابر $1.2 \pm 0.28 \text{ gCOD}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ و نسبت غذا به ریزاندامگان برابر $0.77 \pm 0.17 \text{ gCOD}/\text{g VSS} \cdot \text{d}$ برای راکتور HAIS-PU، و میزان بارگذاری سطحی $1.2 \pm 0.23 \text{ gCOD}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ، نسبت غذا به ریزاندامگان $0.99 \pm 0.15 \text{ COD}/\text{gVSS} \cdot \text{d}$ برای راکتور HAIS-PE، در این بارگذاری‌ها، بازده حذف COD و میزان تولید بیوگاز عبارت بود از: $15/2 \pm 6/3 \%$ و $1771 \pm 704 \text{ ml}/\text{d}$ برای UASB، $17/5 \pm 2/5 \%$ و $1160 \pm 300 \text{ ml}/\text{d}$ برای HAIS-UP، و $18/6 \pm 1/6 \%$ و $1018 \pm 625 \text{ ml}/\text{d}$ برای HAIS-PE. نتایج این بررسی نشان داد که راکتور UASB با حفظ لجن دانه‌بندی شده در طول مدت زمان راهبری، و همچنین با دارا بودن قسمت کارآمد جداکننده‌ی گاز-مایع (GLS)، عملکرد بهتری از راکتورهای HAIS حاوی لجن تثبیت شده^۱ و با بهره‌گیری از دو جمع‌آوری‌کننده‌ی بیوگاز با دو شکل مختلف: لوله‌ی سوارخ‌دار (HAIS-PU) و صفحه‌ی شیاردار HAIS-PE است. در بین دو راکتور HAIS، عملکرد راکتور HAIS-PU بهتر از راکتور HAIS-PE بود. این برتری می‌تواند به تخلخل بیشتر بستر (ε) در راکتور HAIS-PU (ε = ۰/۳۲) و پایین‌تر بودن احتمال ایجاد اتصال کوتاه هیدرولیکی نسبت به راکتور HAIS-PE (ε = ۰/۲۸) مرتبط باشد.

در این راکتورها شرایط برای بهره‌برداری در زمان ماند سلولی بالا و زمان ماند هیدرولیکی کم، فراهم می‌آید. شکل جدیدی از بیوراکتورهای بستر ثابت بی‌هوازی با ظرفیت بالای ماند بیومس در دهه‌ی اخیر پیشنهاد شده است.^[۱] محققان راکتور جریان افقی با بستر لجن ثابت بی‌هوازی (HAIS) حاوی اسفنج پلی‌یورتان را مورد آزمایش قرار دادند.^[۲] مطالعات دیگری بر روی فاضلاب صنایع کاغذسازی^[۳] و سوپستره گلوکز تحت شرایط بهره‌برداری مختلف

مقدمه کاربرد فرایندهای پیشرفته تصفیه بی‌هوازی فاضلاب‌های صنعتی در سال‌های اخیر روبه فزونی گذاشته است. علت این امر عمدتاً سادگی راهبری، هزینه‌ی پایین، و انرژی مصرفی به‌مراتب کم‌تر در مقایسه با سیستم‌های هوازی است. راکتورهای بستر بی‌هوازی با جریان رو به بالا (UASB) و فیلترهای بی‌هوازی نمونه‌هایی از این سیستم‌ها هستند که براساس مفهوم بیومس ثابت مورد استفاده قرار گرفته‌اند.^[۱]

ج) راکتور UASB با حجم ۳/۳ لیتر، مرکب از لوله‌یی از جنس پلکسی گلاس به طول ۱ متر و قطر ۶۵ میلی‌متر ساخته شد. برای جداسازی پساب از قیفی به حجم ۵۰۰ ml از جنس پلکسی گلاس متصل به لوله PVC با قطر ۱۰ میلی‌متر دارای چندین سوراخ با قطر ۷ میلی‌متر در قسمت پایین لوله به منظور هدایت پساب از داخل راکتور به داخل قیف، استفاده شد. گاز حاصله در بالای راکتور و در زیر قیف جمع‌آوری پساب، جمع شد و توسط لوله‌یی با قطر ۱۰ میلی‌متر به داخل گازمتر هدایت شد (شکل ۱ ج).

به منظور دست‌یابی به شرایط پایدار در سیستم و برقراری دبی و بارگذاری یکنواخت در سه راکتور، در طول شبانه روز از دو دستگاه پمپ تزریقی و یک دستگاه پمپ چکانه^۳ استفاده شد. برای تثبیت دمای راکتورها و سوبستره‌ی ورودی، در اطراف هر سه راکتور، سه حمام آب گرم ساخته شده و با استفاده از سه گرم‌کننده دمای راکتورها در تمام طول مطالعه در محدوده‌ی $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ حفظ می‌شد. دمای سوبستره نیز با تعبیه‌ی گرم‌کننده در مخزن ذخیره‌ی سوبستره در محدوده‌ی $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ نگاهداری



شکل ۱. شماتیک راکتورهای HAIS-PU و PE و UASB.

جدول ۱. مشخصات آکنه‌ها در راکتورهای HAIS.

فوم پلی‌اتیلن (PE)	گرانول پلی‌یورتان (PU)	
۳/۵	۳/۵	قطر دانه‌های بستر (میلی‌متر)
۴۲	۳۸	تخلخل بستر %
۱۳۵۰	۱۱۰۰	نسبت سطح به حجم m^2/m^3
۲/۵	۱/۵	سطح بستر متر مربع
۱۲	۷۰۰	دانسیته بستر گرم بر لیتر
۱۹۰۰	۱۴۰۰	حجم بستر میلی‌لیتر

انجام شد.^[۵] در هر دوی این تجربه‌ها، مدت زمان راه‌اندازی کم‌تر از ۱۰ روز بود و شبکه‌ی اسفنجی پلی‌یورتان محیط خوبی را برای رشد و ماند بیومس فراهم می‌آورد.^[۶] چندین ماده‌ی نگه‌دارنده به‌عنوان بستر برای ثابت نگه‌داشتن سلول‌ها^۲ در راکتورهای مختلف برای تصفیه‌ی بی‌هوازی فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته است.^[۷] در بین آنها می‌توان به ژل آگار، اکریل آمید، مواد سرامیکی متخلخل، و اسفنج پلی‌یورتان اشاره کرد.^[۸-۱۰] شایان ذکر است که بیومس به ماده‌ی نگه‌دارنده می‌چسبد و از شسته و خارج شدن سلول‌ها که عامل عدم کارایی فرایند است، پیشگیری می‌کند.^[۱۱] در مطالعات اخیر، مدل ریاضی و معیارهای طراحی راکتور HAIS برای تصفیه‌ی فاضلاب و تأثیر انتقال جرم بر روی عملکرد بیوراکتور بستر ثابت برای تصفیه فاضلاب مورد بررسی قرار گرفته است.^[۱۲ و ۱۳]

هدف از انجام این طرح، تعیین کارایی فرایند HAIS و مقایسه‌ی آن با فرایند UASB در شرایط مختلف راهبری است. اثر تخلخل بستر بر روی بازده دو آکنه مختلف نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

با استفاده از سوبستره‌ی سنتتیک ($\text{COD} = 1750 \pm 250 \text{ mg/l}$) سه راکتور آزمایشگاهی (دو راکتور HAIS و یک راکتور UASB) در دبی‌های متغیر (بارگذاری‌های آلی و هیدرولیکی متفاوت) مورد مطالعه قرار گرفت. برحسب بازده حذف COD و تولید گاز و دیگر داده‌های به دست آمده مبانی طراحی محاسبه شد:

الف) یک راکتور جریان افقی با بستر ثابت لجن ثابت بی‌هوازی (HAIS-PU) در مقیاس آزمایشگاهی با حجم ۲ لیتر مرکب از یک لوله‌ی شیشه‌یی به طول یک متر و قطر ۵ سانتی‌متر ($L/D = 20$) ساخته شد. در داخل این لوله، لوله‌ی دیگری با قطر ۰/۹ سانتی‌متر برای جمع‌آوری گاز در قسمت بالای لوله تعبیه شد. برای تزریق فاضلاب با دبی مشخص به راکتور، یک پمپ تزریقی (Peristaltic) مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱ الف). مشخصات بستر نگهدارنده (آکنه) در جدول ۱ ارائه شده است.

ب) راکتور HAIS دوم (HAIS-PE) با حجم ۳/۳ لیتر، مرکب از لوله‌یی از جنس پلکسی گلاس به طول ۱ متر و قطر ۶۵ میلی‌متر ($L/D = 15/5$) ساخته شد. در این راکتور، لوله‌ی پلاستیکی جمع‌آوری گاز، با قطر ۰/۱۵ سانتی‌متر در طول راکتور، اما در خارج از آن تعبیه شد و با ایجاد سه منفذ در طول راکتور، به یکدیگر ارتباط داده شد. ضمناً در ارتفاع ۱۵ میلی‌متری از بالای راکتور یک صفحه‌ی جداکننده‌ی سوراخ‌دار به منظور جلوگیری از ورود فاضلاب و لجن و بستر نگه‌دارنده به داخل منافذ خروج گاز، تعبیه شد (شکل ۱ ب).

جدول ۲. ترکیب سوپستره سنتتیک.

نام ترکیب	غلظت (mg/l)
گلوکز	۱۷۵۰
کلرور سدیم	۴۴/۵
کلرور کبالت	۰/۰۸
کلرور فریک	۰/۵
دی سدیم هیدروژن فسفات	۳۳/۴
دی پتاسیم هیدروژن فسفات	۲۱/۷۵
پتاسیم دی هیدروژن فسفات	۸/۵
استات آمونیوم	۴۰۰
بیکربنات سدیم	۲۰۰۰
سولفات فرو	۵۰
سولفات منیزیم	۲۵/۵

نتایج و بحث

لجن بارور کننده اولیه به منظور سازگار شدن با گلوکز به مدت یک ماه در راکتور UASB، با بارگذاری کمتر از $1 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{d}$ تغذیه شد. سپس مقدار 600 ml آن با 40 g/l VSS معادل 40 g/l به میزان 30% حجم راکتور به همراه 1400 mL گرانول پلی یورتان در درون راکتور HAIS-PU ریخته شد. در راکتور HAIS-PE مقدار 950 ml لجن دانه بندی شده با همان مشخصات معادل 30% حجم راکتور به همراه مقدار 1900 ml فوم پلی اتیلن ریخته شد.

راه اندازی سه راکتور با بارگذاری آلی $0.72 \text{ kgCOD/m}^3 \cdot \text{d}$ در راکتور UASB و بارگذاری سطحی آلی $0.1 \text{ kgCOD/m}^2 \cdot \text{d}$ در راکتورهای HAIS-PU&PE آغاز شد. بارگذاری های آلی اولیه در راکتورهای HAIS-PU&PE حدود $2 \text{ kgCOD/m}^3 \cdot \text{d}$ بود زیرا از لجن سازگار شده ی راکتور UASB برای باروری دو راکتور HAIS استفاده شد.

داده های مربوط به عملکرد سه راکتور در طی مدت 320 روز سه دوره شامل دوره راه اندازی، عملکرد مطلوب، و حداکثر بارگذاری در جدول ۳ ارائه شده است.

می شد. سه راکتور با استفاده از لجن دانه بندی شده بارور شده و با تغذیه ی پیوسته با استفاده از سوپستره ی سنتتیک راه اندازی شد. سوپستره ی سنتتیک متشکل از ترکیبات ذکر شده در جدول ۲ با COD در محدوده ی $1750 \pm 250 \text{ mg/l}$ بود.

آزمایشات شامل COD محلول ورودی و پساب سه راکتور، SS و VSS بستر لجن راکتور UASB بود که بر اساس روش های مندرج در کتاب روش های استاندارد^[۱۴] انجام شد. نمونه های COD با استفاده از دستگاه DR-۲۰۰۰ آنالیز شد. بیوگاز با استفاده از گاز متر ساده با روش جایگزینی گاز - مایع اندازه گیری شد. به منظور بررسی

جدول ۳. عملکرد راکتورهای UASB و HAIS.

فاز	راکتور	روزهای دوره	HRT, hr	F/M $\text{gCOD/g VSS} \cdot \text{d}$	SLR $\text{gCOD} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	درصد حذف COD	محصول بیوگاز ml/d
۱	HAIS-PU	۱-۱۲۰	$3/08 \pm 2/74$	$0/84 \pm 0/3$	13 ± 5	$51/8 \pm 2/2$	
۲		۱۲۱-۲۲۰	$2/49 \pm 1/38$	$1/72 \pm 0/77$	28 ± 12	$62/5 \pm 17/5$	1160 ± 400
۳		۲۲۱-۳۲۰	$1/21 \pm 0/78$	$3/14 \pm 1/02$	50 ± 16	$51/6 \pm 2/2$	
۱	HAIS-PE	-	-	-	-	-	
۲		-	-	-	-	-	
۳		۲۵۰-۳۲۰	$0/32 \pm 0/08$	$1/52 \pm 0/99$	23 ± 14	$61/6 \pm 18/6$	1018 ± 645
					OLR $\text{gCOD} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$		
۱	UASB	۱-۱۲۰	$9/54 \pm 7/68$	$0/235 \pm 0/103$	$4/02 \pm 1/71$	$41/9 \pm 1/6$	
۲		۱۲۱-۲۲۰	$4/71 \pm 2/63$	$1/34 \pm 0/82$	$12/8 \pm 6/26$	$64/3 \pm 15/2$	1771 ± 704
۳		۲۲۱-۳۲۰	$1/15 \pm 1/16$	$4/85 \pm 1/61$	$21/27 \pm 6/83$	$57/8 \pm 20/3$	

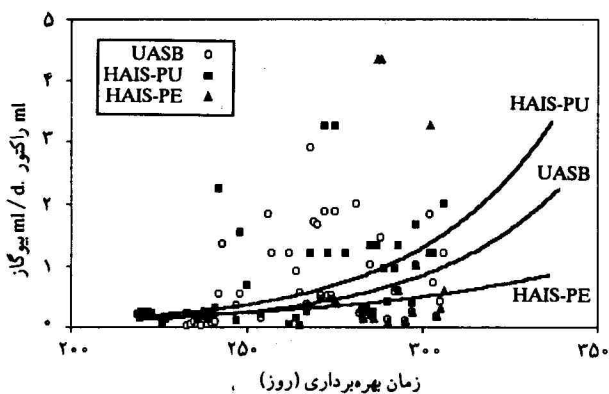
(۱) دوره راه اندازی، (۲) دوره عملکرد مطلوب، (۳) دوره بارگذاری حداکثر بارگذاری آلی سطحی (SLR)، بارگذاری آلی حجمی (OLR)، نسبت غذا به ریزاندامگان (F/M).

بیومس راکتور مشکل ساز است. غلظت لجن در هنگام راه‌اندازی در راکتورهای UASB، HAIS-PU، و HAIS-PE به ترتیب ۱۱/۵، ۱۴، و 13 g VSS.l^{-3} بود. گستره‌ی وسیع غلظت لجن 13 g VSS.l^{-3} تا $4/9 \text{ g VSS.l}^{-3}$ برای فرایندهای بستر ثابت گزارش شده است. در اغلب سیستم‌های بیوفیلمی، حداکثر حذف سوستره بر مبنای $1 \text{ g COD.g VSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ قرار می‌گیرد، اگر چه در مورد این معیار، استثنائات قابل توجهی، از جمله فاضلاب‌های غنی از استات، گزارش شده است.

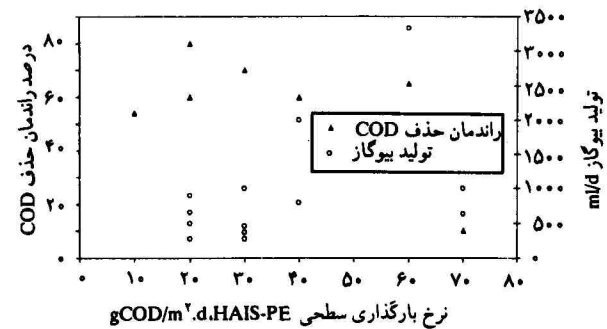
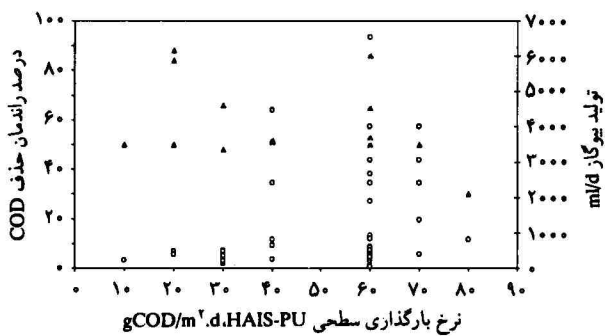
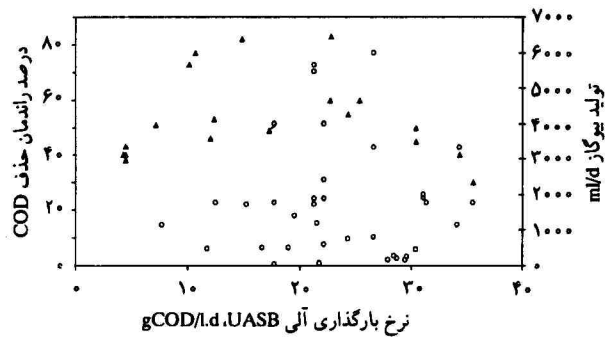
چنان که در شکل ۲ دیده می‌شود، به‌دنبال هر مرحله افزایش بارگذاری آلی سطحی (در راکتورهای بستر ثابت) و حجمی (در راکتور)، ابتدا راندمان حذف و همچنین تولید بیوگاز کاهش می‌یابد، اما بعد از سپری شدن مدتی کوتاه سازگاری افزایش می‌یابد. این روند پس از رسیدن به حد قابل تحمل بیومس، با افزایش بارگذاری معکوس شده، راندمان حذف و تولید بیوگاز به‌طور مداوم روند کاهشی دارد.

بیوگاز: در این مطالعه با توجه به بهره‌برداری سه‌راکتور در دمای $30 \pm 2^\circ\text{C}$ ، نسبت میزان تولید گاز به ازای واحد حجم راکتور در روز در راکتور UASB در محدوده $3 \text{ ml/ml.d} - 10 \text{ ml/ml.d}$ ، در راکتور HAIS-PU در محدوده $3 \text{ ml/ml.d} - 7 \text{ ml/ml.d}$ و در راکتور HAIS-PE در محدوده $4 \text{ ml/ml.d} - 8 \text{ ml/ml.d}$ متغیر است. با وجود ۷۵ درصد متان در بیوگاز، متان تولیدی در سه راکتور UASB، HAIS-PU و HAIS-PE به ترتیب به میزان $2/25 \text{ ml CH}_4/\text{ml.d}$ ، $1/5$ و ۱ متغیر است (شکل ۳).

در راکتوری که در دمای 35°C مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد، تولید مواد زائد تجزیه‌پذیر به سهولت معادل $1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ است. به ازای هر 10°C کاهش در دمای بهره‌برداری راکتورهای بی‌هوای،



شکل ۳. نسبت حجم بیوگاز تولیدی به حجم مفید راکتور در روز در راکتورهای UASB، HAIS-PU و HAIS-PE.



شکل ۲. راندمان حذف COD و تولید بیوگاز در بارگذاری‌های مختلف آلی سطحی و حجمی در سه راکتور.

بارگذاری آلی در دوره‌ی عملکرد مطلوب برای راکتور UASB برابر $13 \pm 6 \text{ g COD.l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ و میزان بارگذاری آلی سطحی در دوره‌ی مذکور برای راکتور HAIS-PU به میزان 28 ± 12 و برای راکتور HAIS-PE به میزان $23 \pm 14 \text{ g COD.m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ متغیر بود. افزایش غیرمتعارف در بارگذاری حجمی راکتورهای بی‌هوای بستر ثابت ممکن است فقط به تشکیل غلظت‌های بالای بیومس در داخل راکتور بیانجامد. ماهیت و اندازه‌ی بستر نگه‌دارنده‌ی بیوفیلیم نقش عمده‌ی در تعیین غلظت بیومس، که می‌تواند در راکتور بستر ثابت باقی بماند، ایفا می‌کند. برای راکتورهای بستر ثابت، دانه یا قطعات کوچکتر بستر که در مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد، ممکن است منجر به برآوردهای غیرواقع‌بینانه از ماند جامدات و بارگذاری‌های قابل دست‌یابی در مقایسه با مقیاس‌های صنعتی شود. علاوه بر این، وجود بستر در تعیین غلظت

پساب برای حفظ سرعت مطلوب (۱ m/h) در داخل راکتور ضرورت ندارد. برای نسبت‌های H/D بین ۳-۱ به ترتیب از کم‌تر از ۱ تا کم‌تر از ۱۰ درصد پساب برگشت داده می‌شود. با توجه به این‌که سرعت بهینه‌ی جریان فاضلاب در راکتورهای بستر ثابت برابر ۱ m/h، و در راکتورهای بستر انبساط یافته (EB) برابر ۷/۵ m/h، و در راکتورهای بستر شناور (FB) برابر ۱۳/۵ m/h فرض می‌شود، نسبت برگشت پساب در راکتورهای EB بین ۱ تا ۲۰ درصد و در راکتورهای FB بین ۱۰ تا ۸۰ درصد است.

در این مطالعه، با توجه به نسبت H/D بین ۱۵ در راکتور UASB، L/D برابر ۲۰ در HAIS-PU و L/D برابر ۱۵ در راکتور HAIS-PE و نیز با توجه به رقیق بودن فاضلاب ورودی (COD = ۱۷۵۰ ± ۲۵۰ mg/l)، برگشت پساب ضرورت نداشت.

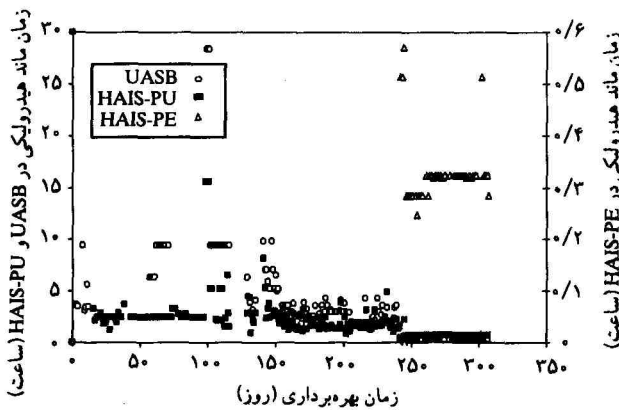
زمان ماند: مطالعات انجام شده بر روی سینتیک ریزاندامگان بی‌هوای، حداکثر رشد ویژه برای محیط کشت بی‌هوای مخلوط در ۳۵°C را معادل ۰/۴ d^{-۱} نشان می‌دهد. مطابق با این سرعت رشد، حداقل SRT (بر اساس معادله SRT_{min} = ۱/μ_{max}) ۲/۵ روز است. اگر زمان ماند هیدرولیکی راکتور (HRT) بیشتر از این مقدار باشد، باکتری‌های بی‌هوای می‌توانند به صورت رشد معلق در داخل فاز مایع تکثیر شوند. در HRT کم‌تر از ۲/۵ روز، رشد ثابت غالب خواهد شد.

در این مطالعه، چنان‌که در شکل ۵ دیده می‌شود، زمان ماند هیدرولیکی (HRT) راکتور UASB، HAIS-PU & PE به ترتیب در گستره‌های ۲۸-۱، ۱۵/۵-۱ و ۲-۱ در تغییرند. HRT فرایند بستر ثابت را می‌توان تا ۲/۵ ساعت کاهش داد. تعداد موارد HRT کم‌تر از ۲/۵ ساعت در این مطالعه که مربوط به بارگذاری‌های بالاست، اندک است.

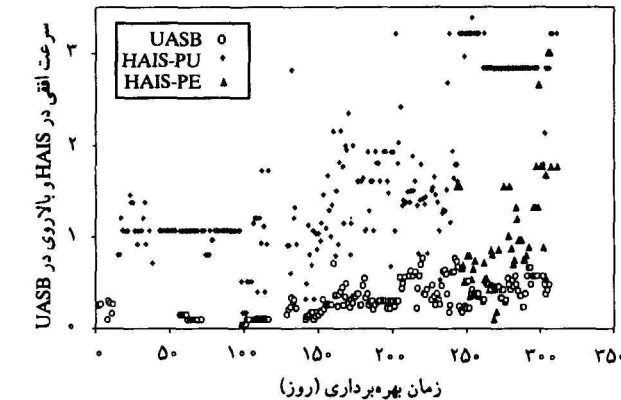
لازم است اندازه راکتور تقریباً ۲ برابر افزایش یابد. کم‌ترین دما برای بهره‌برداری از راکتورهای بی‌هوای حدود ۱۰°C است، اگر چه در عمل، دمای ۲۰°C حداقل دمای محافظه کارانه‌تر است.

هیدرولیک و اختلاط راکتورها: چنان‌که در شکل ۴ مشهود است، سرعت بالاروی در راکتور UASB بین ۰/۷۶-۰/۳۰ m/h و سرعت افقی فاضلاب با در نظر گرفتن ضریب پوکی بستر در راکتور HAIS-PU بین ۲/۶-۰/۱۵ m/h و در راکتور HAIS-PE بین ۱/۸-۰/۹ m/h در تغییر است. در راکتورهای UASB سرعت بالاروی بهینه ۰/۵ m/h عنوان شده است. در راکتورهای بی‌هوای بستر ثابت همچون HAIS، سرعت مطلوب ۱ m/h گزارش شده است. در کلیه راکتورهای بی‌هوای پیشرفته اعم از UASB، راکتورهای بستر ثابت، بستر شناور و بستر انبساط یافته، در صورتی که فاضلاب ورودی رقیق شده باشد، برای برقراری سرعت مناسب از فاضلاب خام استفاده می‌شود؛ اما در مورد فاضلاب‌هایی با غلظت بالاتر، برای حفظ سرعت بالاروی و یا سرعت افقی با در نظر گرفتن شرایط بارگذاری آلی مناسب برگشت پساب ضرورت دارد. میزان برگشت پساب در راکتورهای بستر ثابت در حداقل مقدار نگه داشته می‌شود؛ علت این امر یکی نیاز به استفاده از نیروی زیاد برای برگشت دادن پساب، و دیگری پیشگیری از شسته و خارج شدن بیومس غیرچسبیده‌ی موجود در راکتور است. نیاز به سرعت‌های پائین، عاملی است که ارتفاع یا طول سیستم‌های بی‌هوای بستر ثابت را محدود می‌کند.

با افزایش نسبت ارتفاع به قطر (H/D) در راکتورهای با جریان رو به بالا و رو به پایین، یا نسبت طول به قطر (L/D) در راکتورهای افقی، سرعت‌های واقعی بیشتری در راکتورها برقرار می‌شود. در راکتورهای بستر ثابت و برای نسبت‌های H/D بین ۳-۵، برگشت



شکل ۵. زمان ماند هیدرولیکی در راکتورهای UASB; HAIS-PU; HAIS-PE.



شکل ۴. سرعت روبه‌بالا در راکتور UASB، سرعت افقی در راکتورهای HAIS-PU و HAIS-PE.

برقراری رشد معلق در یک راکتور بی‌هوای با لایه‌ی ثابت از طریق حفظ HRT کوتاه در راکتور امکان‌پذیر است. وقتی که رشد معلق مورد نظر باشد، بهره‌برداری راکتور به سمت فرایند رشد معلق با اختلاط کامل متمایل است که در این صورت بستر نگاه‌دارنده نسبتاً بدون استفاده است. تحت چنین شرایطی پساب حاوی مقادیر زیادی جامدات معلق خواهد بود.

نسبت سطح به حجم بستر: انتقال جرم سوخته به داخل بیومس زمانی سریع‌تر می‌شود که نسبت سطح به حجم ذرات نگاه‌دارنده‌ی بیومس (A/V) زیاد باشد. نسبت A/V در اغلب بسترهای متعارف شامل حلقه‌های پلاستیکی در هم^۵ و یا بسترهای دارای کانال‌های متقاطع^۶ کمتر از $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ است. تحقیقات نشان می‌دهد که مساحت سطح ویژه‌ی بستر تا میزان $220 \text{ m}^2/\text{m}^3$ در عملکرد راکتور بهبود قابل توجهی ایجاد نمی‌کند. در این مطالعه نسبت سطح به حجم بستر نگاه‌دارنده‌ی راکتور HAIS-PU از جنس گرانول پلی‌یورتان برابر $1100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ و در راکتور HAIS-PE از جنس فوم پلی‌اتیلن برابر $1350 \text{ m}^2/\text{m}^3$ است. نسبت A/V در راکتورهای بستر ثابت با جریان‌های روبه‌بالا و رو به پایین که اندازه‌ی قطعات بستر آنها $15\text{cm} - 9\text{cm}$ است، در محدوده‌ی 70 تا $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ است. در راکتورهای بستر انبساط یافته (EB) و بستر شناور (FB) که اندازه‌ی بستر آنها 3mm است، نسبت A/V بین 4000 تا $11000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ است. بر این اساس، نسبت A/V در راکتورهای HAIS در محدوده‌ی بین دو نوع راکتور بستر ثابت و راکتور EB/FB قرار می‌گیرد.

$[A/V \text{ HAIS}: 1100 - 1350 \text{ m}^2/\text{m}^3] > [A/V \text{ EB/EB}: 4000 - 11000 \text{ m}^2/\text{m}^3]$
 و اندازه‌ی دانه‌های بستر راکتورهای HAIS نیز در محدوده بین اندازه دانه‌های دو نوع راکتور فوق قرار می‌گیرد.

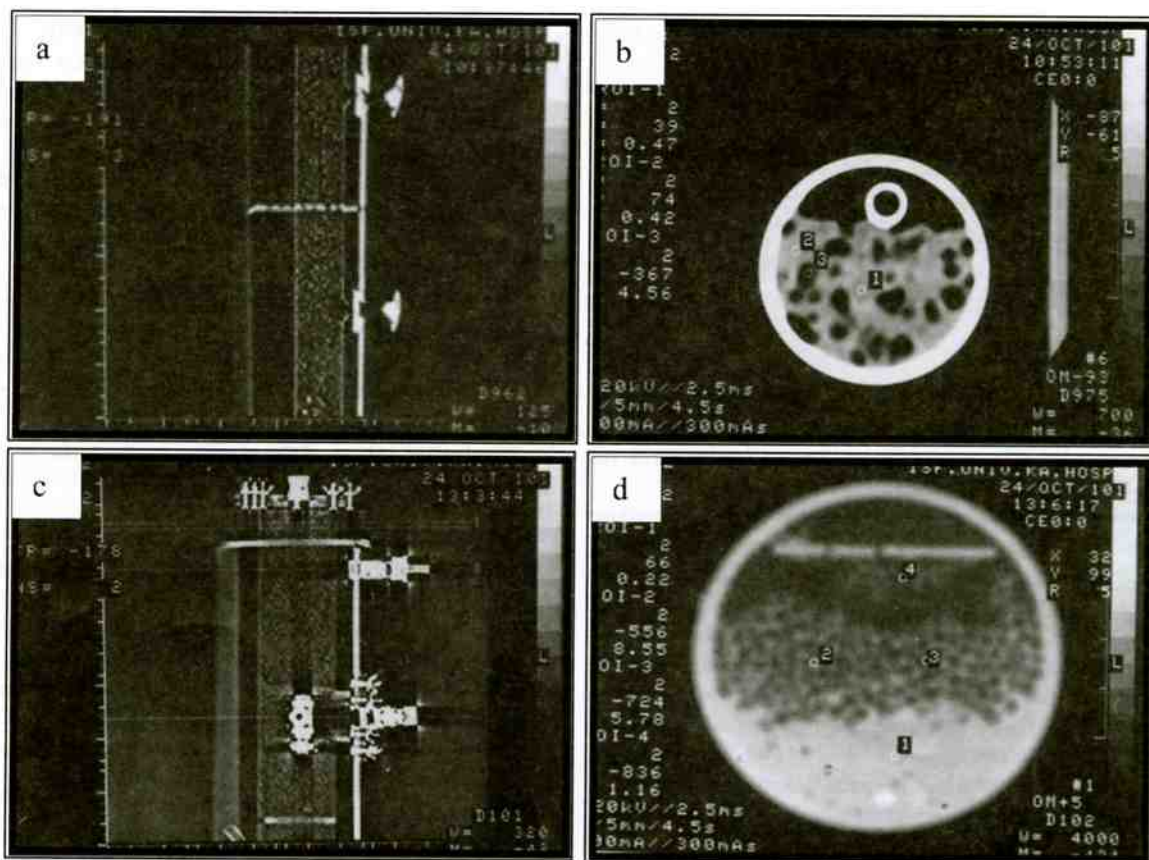
$(9-15\text{mm}) < (\text{بستر ثابت}) < (\text{HAIS}: 3-5\text{mm}) < (\text{EB/FB}: 0/3\text{mm})$
 درصد پوکی بستر: درصد پوکی بستر در راکتورهای بستر ثابت $45-95$ درصد، در راکتورهای بستر انبساط یافته (EB) $45-55$ درصد، در راکتورهای بستر شناور (FB) $30-50$ درصد گزارش شده است. درصد پوکی بستر در راکتور HAIS-PU با گرانول یورتان به‌عنوان بستر نگاه‌دارنده حدود 38% و راکتور HAIS-PE با بستر فوم پلی‌اتیلن حدود 43% بود.

نتایج مطالعات نشان داده شده است که حجم پوکی اولیه‌ی بستر پس از گذشت یکسال از شروع بهره‌برداری راکتور بستر ثابت به دلیل تجمع جامدات زیست‌شناختی در بستر نگاه‌دارنده تا 25 درصد کاهش یافته است. پس از گذشت دو سال از شروع بهره‌برداری، حجم

پوکی اولیه به میزان 80% کاهش یافته، که منجر به انسداد بستر و یا جریان با اتصال کوتاه^۷ شده است. در این زمان بستر با استفاده از برگشت بیوگاز شستشو داده شده است. این نتایج از طریق مشاهده‌ی مستقیم قسمتی از بستر پس از گذشت یکسال تأیید شده است. در این زمان ضخامت بیوفیلم بین 2 تا 3 میلی‌متر بوده است. با فرض این که میزان رشد در تمام حجم راکتور یکنواخت و مشابه یکدیگر باشد، کاهش در میزان پوکی اولیه تقریباً 16% است.

اسکن بستر: در روز 327 بهره‌برداری از راکتور HAIS-PU و روز 99 بهره‌برداری از راکتور HAIS-PE با استفاده از دستگاه CT-Scan، مقاطع ورودی، شیرهای 1 تا 4 و خروجی دو راکتور و نیز نمونه‌های شاهد شامل بستر نگاه‌دارنده (گرانول پلی‌یورتان و فوم پلی‌اتیلن) با لجن اولیه بارورکننده و بدون لجن اولیه بارورکننده اسکن گردیده و عکس تهیه شد. هدف از این کار، پی بردن به نحوه‌ی شکل‌گیری بیومس در اطراف بستر نگاه‌دارنده است، تا از این طریق بتوان در دوره‌های بعدی راهبری راکتور مجدداً از مقاطع مختلف راکتور اسکن تهیه کرد و تغییرات احتمالی در شکل‌گیری بیوفیلم را مشاهده نمود.

تحقیقات در مورد نفوذ سوخته به داخل بیوفیلم بی‌هوای ثابت نشان داده است که مقاومت بیوفیلم در برابر انتشار سوخته، تا زمانی که ضخامت بیوفیلم بین $0/3$ تا $1/0$ میلی‌متر برسد قابل توجه نخواهد بود. این نکته بیانگر آن است که مقاومت بیوفیلم در برابر انتشار عملاً اهمیتی ندارد، زیرا ضخامت بیوفیلم بی‌هوای معمولاً کم‌تر از این مقادیر است. این فرضیه با ارائه‌ی گزارشی مبنی بر این که مقاومت بیوفیلم در راکتور بستر انبساط یافته‌ی دیگر دوست به‌ندرت از $0/2$ میلی‌متر تجاوز می‌کند، تأیید شده است. در سیستم‌های گرمادوست عمق بیوفیلم تا میزان $0/17$ میلی‌متر مشاهده شده است. در اسکن HAIS-PU (شکل ۶ الف و ب) شکل‌گیری بستر لجن در اطراف دانه‌های پلی‌یورتان مشهود است. علاوه بر این، با استفاده از روش اسکن CT امکان برآورد چگالی مقاطع اسکن شده وجود دارد. نظر به اینکه گستره‌ی اعداد در دستگاه اسکن CT برای بافت‌های سخت و نرم بدن انسان اعم از استخوان، ماهیچه‌ها، چربی، خون، و فضاهای خالی بین بافت‌ها تعریف شده است، می‌توان در راکتور، بافت‌ها را به‌طور نسبی تشخیص داد. چنان که در اسکن 5 ب مربوط به HAIS-PU مشخص شده است، شماره 1 با چگالی [۳۹] مشابه بافت نرم یا خون است و به نظر می‌رسد که محل قرارگرفتن بیومس با غلظت کم (جامدات معلق) باشد. شماره‌ی 2 با چگالی [۷۴] مشابه با لجن با غلظت بیشتر است و به نظر می‌رسد که محل قرارگیری



شکل ۶. تصاویر اسکن راکتورهای: HAIS-PU (b,a) HAIS-PE(d,c)

چگالی [۶۶]. بیومس با غلظت بالا (احتمالاً بیوفیلیم) است. شماره ۲ با چگالی [-۵۵۶] ذرات فوم است. شماره ۳ با چگالی [-۷۲۴] احتمالاً گاز محبوس شده در داخل بیوفیلیم و شماره ۴ با چگالی [-۸۳۶] بیوگاز است (شکل ۶ ج و د).

نتیجه

نتایج این بررسی نشان داد که راکتور UASB با حفظ لجن دانه‌بندی شده در طول مدت زمان راهبری، و همچنین با دارا بودن قسمت کارآمد جداکننده‌ی گاز-مایع (GLS)، نسبت به راکتورهای HAIS حاوی لجن تثبیت شده^۸ و با بهره‌گیری از دو جمع‌آوری‌کننده‌ی بیوگاز با دو شکل مختلف: لوله‌ی سوراخ‌دار (HAIS-PU) و صفحه‌ی شیاردار (HAIS-PE) عملکرد بهتری دارد. در بین دو راکتور HAIS-PU، عملکرد راکتور HAIS-PU بهتر از راکتور HAIS-PE بود. این برتری می‌تواند با تخلخل بیشتر بستر (ε) در راکتور HAIS-PU (ε=۰/۴۲) نسبت به راکتور HAIS-PE (ε=۰/۲۸) در ارتباط باشد. اتصال کوتاه ناشی از تخلخل کم بستر می‌تواند علت اصلی این عملکرد باشد.

بیوفیلیم بر روی سطح دانه‌ی پلی‌یورتان باشد. شماره ۳ با چگالی [-۳۶۷] با چگالی هوا یا فضای خالی شبیه است و به نظر می‌رسد که محل تجمع بیوگاز باشد. دایره‌ی بزرگ بالای اسکن، مقطع لوله‌ی جمع‌آوری گاز را نشان می‌دهد. (شکل ۶ الف و ب).

در اسکن ۶ مربوط به راکتور HAIS-PE با گذشت ۹۹ روز از زمان راه‌اندازی راکتور، در مقاطع نزدیک به ورودی راکتور و شیر ۱، فوم‌های احاطه شده توسط بیوفیلیم به‌طور یکنواخت در مقطع راکتور دیده می‌شود. قسمت بالایی اسکن صفحه‌ی شیارداری را نشان می‌دهد که بستر لجن را از قسمت‌های بالای راکتور جدا می‌کند و بالای این صفحه محفظه‌ی تجمع بیوگاز و انتقال آن به لوله‌ی جمع‌آوری‌کننده‌ی گاز را که در خارج راکتور واقع است، تشکیل می‌دهد.

در اسکن تهیه شده از نزدیک انتهای راکتور، فوم پلی اتیلن پوشیده شده از لایه‌ی نازک بیوفیلیم و لجن بارور کننده‌ی اولیه، نشان‌دهنده‌ی آن است که در مقاطع آخر راکتور HAIS-PE هنوز بستر نگه‌دارنده به‌خوبی در داخل لجن فرو نرفته است. در اسکن ۶ چهار نقطه با شماره‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ مشخص شده است. شماره ۱ با

پانوشت

1. immobilized sludge
2. Cell-immobilization
3. infusion
4. surface-to-volume ratio
5. random plastic pall rings
6. crossflow modular media
7. short-circuiting
8. immobilized sludge

منابع

1. Torkian A. M. M. Amin, H. Movahedian, S. J. Hashemian, M.S. Salehi, Performance evaluation of UASB system for treating slaughterhouse wastewater, *Scientia Iranica*, 9 (2), pp 176-180, (2002).
2. Varesche M.B. et.al. Microbial colonization of polyurethane foam matrices in horizontal-flow anaerobic immobilized-sludge reactor. *J. Appl. Microbiol. Biotechnol*, 48, pp 534-538, (1997).
3. Zaiat, M. et. al. Cell wash-out and external mass transfer Resistance in Horizontal-flow Anaerobic Immobilized Sludge Reactor. *J. Wat. Res.* 30 (10), pp 2435-2439, (1996).
4. Droste R.L. *Theory and practice of water and wastewater treatment*, Wiley. (1997).
5. Zaita M. et. al., Spatial and temporal variations of monitoring performance parameters in Horizontal-Flow Anaerobic immobilized Sludge (HAIS) reactor treating synthetic substrate. *J. Wat. Res.* 31 (7), pp 1760-1766, (1997).
6. Cadavid D.L. et. al. Performance of Horizontal-flow Anaerobic Immobilized Sludge (HAIS) reactor treating synthetic substrate subjected to decreasing COD to sulfate ratios. *J. Wat. Sci. Tech.* 39 (10-11), pp 99-106, (1999).
7. Malina J.F. & F.G. Pohland. *Design of anaerobic process for the treatment of industrial and municipal wastewaters*, technomics. (1992).
8. Gijzen, H. and F. Kansime Comparison of start-up of an Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactor and a polyurethane carrier reactor. *J. Wat. Sci. Tech.* 34 (5-6), pp 509-515, (1996).
9. Jhung J.K., E. Chot. A comparative study of UASB and anaerobic fixed film reactors with development of sludge granulation, *J. Wat. Res.* 29 (1), pp 271-277, (1995).
10. Miyahard T. et. al. Role of filter media in an anaerobic fixed-bed reactor. *J. Wat. Sci. Tech.* 31 (9), pp 137-144, (1995).
11. Eckenfelder W. W. *Industrial Water Pollution Control*. Third Edition, McGraw-Hil. (1999).
12. Sarti A. et. al. Influence of the liquid-phase mass transfer on the performance of a packed-bed bioreactor for wastewater treatment. *J. Bioresource Technology*, (78), pp 231-238, (2001).
13. Zaita M. et. al., External and internal mass transfer in an anaerobic fixed-bed reactor for wastewater treatment. *J. Process Biochemistry*, 35, pp 943-949, (2000).
14. APHA, WEF and AWWA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th Ed. Clesceri, L.S., Greenberg, A.E., and Eaton, A.D. (eds.) American Public Health Association, Washington, DC. (1998).