

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



مقاله نویسی علوم انسانی



اصول تنظیم قراردادها



آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله

عوامل مؤثر بر گرانوله شدن لجن در شرایط بی‌هوازی

جلال شایگان^۱

آزاده همتی^۲

محمد صالح یوسف‌نژاد کبری^۲

(دریافت ۸۸/۱/۱۹ پذیرش ۸۸/۱۱/۷)

چکیده

در این مقاله تأثیر عوامل مختلف بر فرایند گرانولاسیون بی‌هوازی لجن مورد بررسی قرار گرفت. عمده‌ترین علت موفقیت راکتورهای UASB در تصفیه بی‌هوازی فاضلاب را می‌توان تشکیل لجن گرانوله در شرایط بی‌هوازی دانست. حاصل این فرایند، کاهش در اندازه راکتور و سطح مورد نیاز و در نتیجه کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری است. همچنین به‌دلیل عدم هوادهی، هزینه‌های عملیاتی نیز کاهش می‌یابد. اندازه لجن گرانوله یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر کارایی راکتورهاست که در این مطالعه به بررسی برخی از عوامل مؤثر بر این پارامتر پرداخته شد. برخی از عوامل مؤثر بر فرایند گرانولاسیون بی‌هوازی لجن عبارت‌اند از حضور هسته‌های رشد به‌صورت ذرات بی‌اثر و یا لجن گرانوله، شرایط عملیاتی فرایند مانند بار لجن، بار آلی و روند افزایش نرخ بار و شرایط محیطی مانند وجود مواد مغذی لازم، دما، pH و ترکیب.

واژه‌های کلیدی: گرانوله‌شدن بی‌هوازی لجن، اندازه لجن گرانوله، راکتور UASB

Factors Involved in Sludge Granulation under Anaerobic Conditions

Jalal Shayegan¹

Azadeh Hemati²

Mohammad Saleh Yousefnejad Kebria²

(Received Apr. 8, 2009 Accepted Jan. 27, 2010)

Abstract

This paper investigates the effects of factors involved in sludge anaerobic granulation. Granulated sludge formation is the main parameter contributing to the success of UASB reactors. Anaerobic granulation leads to reduced reactor size, space requirement, and investment costs. Operation costs are also greatly reduced due to lack of aeration. An important parameter affecting process performance is the size of sludge granules; the factors involved in granule size will be investigated. Some of the important parameters of anaerobic sludge granulation are: existence of growth cores as inert particles or granulated sludge, process operational conditions (Sludge Loading Rate and Organic Loading Rate, Loading rate increase and ...), and environment conditions (nutrients, temperature, pH, combination and ...).

Keywords: Sludge Anaerobic Granulation, Size of Granulated Sludge, UASB Reactor.

1. Prof. of Environmental Eng., Dept. of Chemical and Petrochemical Eng., Sharif University of Tech., Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 66165420 shayegan@sharif.edu

2. M.Sc. Student of Environmental Eng., Dept. of Chemical and Petrochemical Eng., Sharif University of Tech., Tehran

۱- استاد گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران (نویسنده مسئول) ۶۶۱۶۵۴۲۰ (۰۲۱)، shayegan@sharif.edu
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

ساختار میکروبی قوی و متراکم، از سرعت ته‌نشینی خوبی برخوردارند. بنابراین زمان اقامت زیست توده^۳ در راکتورهای UASB بیشتر از راکتورهای زیستی دیگر است. این گرانول‌ها دارای آستانه سمیت بالایی هستند و در بار آلی زیاد استقامت می‌نمایند. فعالیت متانوژنیک ویژه لجن گرانوله زیاد است. این فرایند با سرعت‌های بارگذاری آلی با بیش از ۵۰ کیلوگرم COD بر متر مکعب در روز، تحت شرایط مزوفیلیک و با فعالیت متانوژنیک ویژه بیش از ۲ کیلوگرم VSS در روز به خوبی سازگار می‌شود.

اکثر فرضیات ارائه شده در مورد تولید گرانول، بر این موضوع تأکید دارند که باکتری استوتروفیک و متانوژن متانوژنیکس^۴ نقش کلیدی در فرایند گرانوله شدن لجن ایفا می‌نماید. عده‌ای از پژوهشگران نیز معتقدند که باکتری متانوسارسینا^۵ تشکیل گرانول را بهبود می‌بخشد. توافق قابل ملاحظه‌ای بر روی این مطلب وجود دارد که مرحله آغازین تولید گرانول، اتصال و چسبندگی باکتریایی است که عمدتاً یک فرایند فیزیکی-شیمیایی است و در مراحل اولیه تشکیل زیست لایه صورت می‌پذیرد [۵].

در این مقاله تأثیر عوامل مختلفی مانند شرایط فرایندی، هیدرودینامیکی و محیطی بر فرایند گرانولاسیون بی‌هوازی لجن مورد بررسی قرار گرفت.

۲- اندازه گرانول‌ها

اندازه لجن گرانوله بین ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر گزارش شده است. تکنیک آنالیز تصویری^۶ می‌تواند برای ارزیابی توزیع اندازه گرانول‌ها در لجن، مورد استفاده قرار گیرد. تغییر فعالیت متانوژنیک با اندازه گرانول، پارامتر مهمی است که بیانگر مزیت لجن گرانوله نسبت به فرم لخته‌ای است. فعالیت ویژه متانوژنیک برای لجن گرانوله در محدوده ۰/۳ تا ۱/۲ گرم CH₄ بر گرم VSS در روز و برای یک لجن گرانوله خوب نیز، بیش از ۲ گرم CH₄ بر گرم VSS در روز گزارش شده است [۶].

حداقل اندازه گرانول‌ها که برای اقامت بهتر لجن در راکتور UASB لازم است، با وزن مخصوص لجن تغییر می‌نماید. عدد رینولدز ذرات با اندازه کوچک، کمتر از ۱ است و سرعت ته‌نشینی این ذرات به جای وابستگی به جرم ذره، به مقدار زیادی به ویسکوزیته محیط وابسته است. بنابراین ایجاد هرگونه آشفتگی و تلاطم در سیستم که به وسیله حرکت آب و بیوگاز ایجاد می‌شود، موجب کاهش شدید سرعت ته‌نشینی می‌گردد. اما برای ذرات با وزن مخصوص ۱/۰۳۵ و با قطر بزرگ‌تر از ۰/۳۴ میلی‌متر، عدد

پیشرفتهای جدید در زمینه تصفیه زیستی منجر به موفقیت اقتصادی چشمگیر فرایندهای بی‌هوازی در تصفیه انواع فاضلابهای صنعتی و حتی شهری به‌خصوص در سالهای اخیر گردیده است. فرایند UASB از جمله فناوری‌های بی‌هوازی پرسرعت است که به‌علت سهولت راهبری، هزینه کم در مصرف انرژی و کارایی زیاد، امروزه به‌طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حال حاضر بیش از هزار راکتور UASB در مقیاس صنعتی در سراسر دنیا به‌خصوص آمریکا و اروپا استفاده می‌شود [۱]. با توجه به تحقیقاتی که بر روی این راکتورها انجام شده است، افزودن یک غشا در بالای بستر راکتور می‌تواند منجر به افزایش کارایی و زمان ماند جامد^۱ در راکتور گردد. هضم مواد آلی در راکتور UASB به‌مقدار زیاد وابسته به لجن بی‌هوازی و مشخصات ته‌نشینی آن است. در صورت تشکیل گرانول با کیفیت خوب، راکتور قادر به حذف فاضلاب با بار آلی زیاد خواهد بود. همچنین تشکیل گرانول و تجمع زیست توده می‌تواند مقاومت بیشتری بر سر راه انتقال جرم مواد سمی بازدارنده ایجاد نماید و مانع از تأثیر آن بر فعالیت زیستی گردد [۱].

تشکیل لجن گرانوله را می‌توان مهم‌ترین عامل در موفقیت فرایند بی‌هوازی در تصفیه فاضلابهای صنعتی دانست. در این راکتورها، میکروارگانیسم‌ها در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند تا یک گرانول فشرده با فعالیت زیستی و سرعت ته‌نشینی زیاد تشکیل دهند. این مزیت راکتورهای UASB باعث اقامت بیشتر لجن درون راکتور و حفظ گونه‌های متنوعی از میکروارگانیسم‌ها درون آن می‌گردد. مشکل عمده این فرایند، طولانی شدن زمان راه‌اندازی راکتور است که بسته به نوع فاضلاب بین ۲ تا ۸ ماه به طول می‌انجامد. برای کاهش دوره راه‌اندازی لازم است که مکانیسم تشکیل گرانول‌ها و عوامل مؤثر بر آن به خوبی بررسی شود [۲]. یکی از راههای کاهش زمان راه‌اندازی، استفاده از گرانول‌های کوچک لجن در شروع کار و یا افزودن زغال چوب و یا کلسیم و آهن است تا گرانول سریع‌تر تشکیل گردد. جوندگ و همکاران^۲ به تازگی روش جدیدی را ابداع نموده‌اند که در آن با افزودن پلیمر می‌توان سرعت تشکیل لجن گرانوله را افزایش داد [۳].

مشکل دیگر این فرایند، شناور شدن لجن گرانوله به‌علت تولید بیوگاز در راکتور و یا سرعت زیاد ورود مواد به راکتور است که منجر به از دست رفتن تعادل بین نیروهای بویانسی وارد بر لجن گردیده و آن را از راکتور خارج می‌سازد [۴].

گرانول‌های تشکیل شده معمولاً صاف و گرد هستند و به‌دلیل

³ Biomass

⁴ Methanotrrix Soehngenii

⁵ Methanosarcina

⁶ Image Analysis Technique

¹ Solid Retention Time (SRT)

² Jeong et al.

رینولدز بزرگ تر از ۱ است. یعنی در این ذرات، ته نشینی به وسیله نیروی اینرسی کنترل می شود نه نیروی ویسکوزیته محیط اطراف. سرعت ته نشینی چنین گرانول هایی حدود ۹ متر بر ساعت و در حالت پایدار بزرگ تر از ۳۰ متر بر ساعت است که خیلی بیشتر از سرعت حرکت فاضلاب در راکتور است. بنابراین براساس عدد رینولدز و سرعت ته نشینی، قطر بیوذرات با وزن مخصوص ۱/۰۳۵، باید بزرگ تر از ۰/۴۵ میلی متر باشد [۶].

۳- عوامل مؤثر بر گرانوله شدن

تشکیل گرانول از لجن بی هوازی و بقای آن تحت تأثیر عوامل زیادی است که مهم ترین آن ها عبارتند از:

۱- حضور هسته های رشد به صورت ذرات بی اثر یا لجن گرانوله
۲- شرایط عملیاتی فرایند طی مرحله راه اندازی نظیر بار لجن^۱ و بار آلی^۲، روند افزایش نرخ بار، شرایط هیدرودینامیکی و مقدار هسته های رشد مورد استفاده.

۳- شرایط محیطی مانند وجود مواد مغذی لازم به منظور بهینه نمودن شرایط رشد باکتری، دما به علت وابستگی شدید فعالیت مخصوص لجن متانوژنیک به این پارامتر، pH که باید در محدوده بهینه ۷/۲-۶/۸ و محدوده مجاز ۷/۸-۶/۵ باشد، ترکیب و نوع فاضلاب از نظر حضور و قابلیت تجزیه پذیری مواد آلی و غیر آلی توسط موجودات ذره بینی، ترکیبات یونی شامل غلظت کاتیون هایی نظیر کلسیم، سدیم و آلومینیوم، حضور ترکیبات بازدارنده و غلظت رشد مایه. نشان داده شده است که در برخی موارد، رشد گرانول ها در شرایط دمایی خاص در راکتور امکان پذیر است. به عنوان مثال در یک نمونه پس از کاهش تدریجی دما طی چهار روز و افزایش ناگهانی آن طی ۱۲ ساعت (اعمال نوعی شوک به باکتری ها)، گرانول هایی با قطر حدود ۱ میلی متر تشکیل شد [۷].

۳-۱- بهبود شرایط گرانوله شدن از طریق هسته های رشد

یکی از عوامل کمک کننده در ایجاد و رشد گرانول ها از لجن معلق، حضور هسته ها با حامل های زیستی^۳ به منظور اتصال میکروبی است. این هسته های رشد به صورت ذرات بی اثر و لجن گرانوله در راکتورهای UASB مورد استفاده قرار می گیرند.

۳-۱-۱- ذرات بی اثر

اتصال موجودات ذره بینی به این ذرات به عنوان مرحله آغازین گرانوله شدن، پیشنهاد شده است. از آنجا که مرحله دوم، تشکیل یک

زیست لایه (بیوفیلم) متراکم و ضخیم بر روی ذرات بی اثر است، این مرحله را می توان به عنوان مرحله تشکیل زیست لایه مورد بررسی قرار داد. به عبارت دیگر، زمانی که مجموعه های آغازین تشکیل شدند، فرایند گرانوله شدن که در ادامه رخ می دهد را می توان به صورت پدیده افزایش ضخامت زیست لایه تلقی نمود. به این دلیل، فرایند گرانوله شدن لجن در راکتورهای UASB با افزودن ذرات بی اثر را می توان به عنوان یک پدیده تشکیل زیست لایه تعبیر نمود. یو و همکاران^۴ رهنمودهای زیر را برای انتخاب آگاهانه و دقیق مواد بی اثر برای بهبود گرانوله شدن لجن پیشنهاد داده اند [۸].

۱- سطح مخصوص بالا

۲- وزن مخصوص مشابه با لجن بی هوازی

۳- قدرت آگریزی خوب

۴- شکل کروی.

محققان زیادی تأثیر ذرات بی اثر بر روی گرانوله شدن را مورد مطالعه قرار داده اند. همچنین اهمیت ذرات نگهدارنده بی اثر در فرایند گرانوله شدن اثبات شده است. زمانی که ذرات بی اثر با اندازه ای در حدود ۴۰ تا ۱۰۰ میکرومتر از فاضلاب حذف می شوند، گرانولاسیون در دوره زمانی مورد انتظار (زمان گرانولاسیون لجن پراکنده و بدون حذف ذرات بی اثر)، رخ نمی دهد. از جمله مواد بی اثری که با استفاده از آن ها می توان گرانوله شدن لجن را سرعت بخشید، عبارتند از اسفنج، ژئولیت، هیدروآنتراسیت، پلیمر جذب کننده آب (WAP)، کربن فعال گرانوله (GAC) و کربن فعال پودری شکل (PAC).

غلظت بالای مواد معلق که خاصیت لخته شدن ضعیفی دارند نیز برای ایجاد لجن گرانوله مضر است. همچنین در فاضلاب های رقیق با مقادیر زیاد جامدات معلق بسیار پراکنده، اتصال باکتری ها به ذرات پراکنده می تواند منجر به از بین رفتن و خارج شدن باکتری های کارآمد از درون راکتور شود. غلظت بالای جامدات بی اثر پراکنده برای فرایند گرانوله شدن زیان آور است زیرا در حالتی که مساحت سطح ارائه شده برای رشد باکتری های موجود بسیار بزرگ باشد، رشد متراکم محدود خواهد شد. از آنجا که فرایند گرانوله شدن، به شدت تابع رشد باکتریایی است، یک رشد کم، سبب ایجاد افت و نقصان در فرایند گرانولاسیون می گردد.

۳-۱-۲- لجن گرانوله

از آنجا که لجن گرانوله شامل مقادیر زیادی از زیست توده متانوژنیک فعال است، اضافه کردن مقدار کمی از لجن گرانوله به

¹ Sludge Loading Rate (SLR)

² Organic Loading Rate (OLR)

³ Bio-Carrier

⁴ Yu et al.

راکتور، افزایش نسبتاً سریعی در فعالیت متانوژنیک ایجاد می‌کند. علاوه بر این، لجن گرانوله نقش هسته را برای تشکیل گرانول‌های جدید ایفا می‌نماید.

آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزودن مقدار نسبتاً کمی لجن گرانوله به راکتور، سبب افزایش مقدار بار آلی، کاهش خروج زیست توده از راکتور و افزایش حداقل غلظت لجن در راکتور می‌شود. مطالعات میکروسکوپی، تفاوت عمده‌ای را بین گرانول‌های حاصل، قبل و بعد از افزودن لجن گرانوله نشان می‌دهد. گرانول‌ها قبل از افزودن لجن گرانوله به راکتور، عمدتاً از میکروارگانوسم‌های رشته‌ای تشکیل شده و شامل برخی مواد بی‌اثر ناشی از تجزیه لجن فاضلاب هستند در حالی که گرانول‌های بعد از افزودن لجن گرانوله به راکتور، کوچک‌تر و چگال‌تر شده و سرعت ته‌نشینی آنها افزایش می‌یابد.

۳-۲- شرایط عملیاتی فرایند طی مرحله راه‌اندازی

راه‌اندازی راکتور از نظر اقتصادی یک مرحله بسیار مهم است. راه‌اندازی نامناسب، یک تصفیه ضعیف را به دنبال دارد و در اغلب موارد نیاز به سیستم نگهداری و تصفیه پیشرفته فاضلاب خروجی به چشم می‌خورد. در همه موارد این موضوع باعث کاهش قابلیت تصفیه شده و می‌تواند کیفیت پساب خروجی را به میزان زیادی کاهش دهد. راه‌اندازی، اغلب سخت‌ترین و بی‌ثبات‌ترین فاز فرایند بی‌هوازی محسوب می‌شود و وظیفه اصلی آن ایجاد رشد یک لجن قابل ته‌نشینی بسیار فعال با حداکثر سرعت ته‌نشینی ممکن است. از آنجا که باکتری بی‌هوازی رشد آهسته‌ای دارد، مهم‌ترین مشکلی که در راکتور UASB وجود دارد، راه‌اندازی طولانی‌مدت راکتور و ایجاد خودبخودی گرانول‌هاست. زمان راه‌اندازی برای راکتورهای UASB با استفاده از لجن هضم‌شده معمولاً چندین ماه به طول می‌انجامد. زمان راه‌اندازی طولانی‌مدت، مهم‌ترین عامل بازدارنده در استفاده از سیستم UASB است.

نرخ بار به‌کار گرفته‌شده در راکتور، نقش بسیار مهمی در تشکیل گرانول‌های بی‌هوازی ایفا می‌نماید. به طوری که در فاضلابهای مشابه، خواص لجن با نرخ بار به‌کار گرفته‌شده، تغییر می‌کند. نرخ بار آلی و نرخ بار لجن به‌کار رفته در طول زمان راه‌اندازی و تشکیل گرانول، از مهم‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده لجن به‌شمار می‌روند. این دو پارامتر به ترتیب ظرفیت راکتور بر واحد حجم و ظرفیت میکروارگانوسم‌ها بر واحد جرم موجود در راکتور را برای مصرف زیست‌مایه آلی تعریف می‌کنند. نرخ‌های به‌کار گرفته‌شده در طول تشکیل گرانول‌ها، مسئول میزان استحکام گرانول هستند به طوری که هرچه استحکام گرانول بیشتر باشد، کاهش COD بالاتری نتیجه می‌شود. ایجاد لجن گرانوله با خصوصیات مطلوب نظیر شاخص

حجمی لجن^۱ کوچک‌تر از ۱۶ میلی‌لیتر بر گرم، سرعت متوسط ته‌نشینی بیشتر از ۳۶ متر بر ساعت، غلظت بالای لجن در راکتور و استحکام بالای گرانول‌های ایجادشده که باعث افزایش بازدهی حذف COD تا بیش از ۹۰ درصد می‌شود، از اهداف اصلی راه‌اندازی اولیه است. برای رسیدن به این موقعیت، نرخ بار آلی در محدوده ۲ تا ۴/۵ کیلوگرم COD بر متر مکعب در روز و نرخ بار لجن در محدوده ۰/۱ تا ۰/۲۵ کیلوگرم COD بر کیلوگرم VSS در روز، برای راه‌اندازی اولیه و گرانولاسیون نخستین پیشنهاد شده است. به دلیل فعالیت ویژه بالای لجن گرانوله، کاربرد نرخ بار آلی بالاتر یعنی بیشتر از ۳۰ کیلوگرم COD بر متر مکعب در روز امکان‌پذیر است. همچنین مقدار نهایی بار لجن به ۰/۶ تا ۰/۷ کیلوگرم COD بر کیلوگرم VSS در روز می‌رسد [۶].

عملیات تولید گرانول با افزایش تدریجی نرخ بار لجن بعد از راه‌اندازی صورت می‌گیرد. منطقی است که در طی مرحله راه‌اندازی مقدار SLR تا حد قابل قبولی بالا انتخاب شود تا از یک سو تولید گرانول به سرعت صورت گیرد و از سوی دیگر فرایند، پایداری خود را حفظ نماید. یک افزایش ساده و معقول برای SLR براساس نتایج تجربی این است که هر گاه، حذف COD قابل تجزیه به ۸۰ درصد برسد و در عین حال خروج مواد معلق جامد نیز ثابت بماند، این افزایش صورت پذیرد. فعالیت متان‌زایی ویژه^۲ (SMA) به عنوان مبنای افزایش سرعت راه‌اندازی در نظر گرفته شده است. افزایش پلکانی SLR به صورت ۶۰ تا ۸۰ درصد مقدار متوسط SMA اندازه‌گیری شده، برای راه‌اندازی سریع و تولید گرانول به‌کار می‌رود. افزایش SMA اغلب بلافاصله بعد از شروع کار آغاز می‌شود. این افزایش در دو ماه اول کارکرد چشمگیر است که نشان‌دهنده قابلیت تجزیه زیست مایه توسط موجودات زنده، محیط زندگی مناسب و خوگرفتن سریع باکتری با زیست مایه و متعاقباً تکثیر سریع آنهاست. پس از آن، SMA به آرامی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده نزدیک شدن آن به حالت پایدار است.

رشد ذرات لجن در طی ماه اول به آرامی صورت می‌پذیرد. در این مدت، گرانول‌های فشرده اولیه در پایین‌ترین قسمت راکتور شروع به تشکیل شدن می‌نمایند و به آرامی شتاب می‌گیرند. گرانول‌های اولیه به سرعت در مدت سه ماه به رشد ادامه می‌دهند تا گرانول‌های بزرگ‌تر به قطر ۱ تا ۴ میلی‌متر تشکیل گردد. پس از آن، شدت رشد به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که نزدیک شدن به بلوغ رشد را اثبات می‌نماید [۹].

در مرحله راه‌اندازی، غلظت زیست‌توده درون راکتور ۱۰ تا ۱۵ گرم VSS در لیتر است. در ابتدای عملکرد راکتور، غلظت زیست

¹ Sludge Volume Index (SVI)

² Specific Methan Activity (SMA)

توده پایین است که ناشی از به کار بردن SMA و متعاقباً SLR کم است. در این شرایط، خروج زیست توده به دلیل قابلیت ته نشینی کم لجن هسته، شدیدتر است. در نتیجه غلظت لجن در راکتور به آرامی کاهش می یابد تا بعد از یک ماه عملکرد به حداقل ۷ گرم VSS در لیتر یعنی ۱۲ درصد کم تر از لجن هسته اولیه برسد. با آغاز تولید گرانول، غلظت لجن به تدریج افزایش می یابد که ناشی از تولید شدیدتر زیست توده و خروج کمتر آن است. حداقل فرار لجن در راکتور UASB، ۱۰۰ میلی گرم VSS در لیتر است. غلظت لجن در ابتدای دوره راه اندازی به طور موقت ثابت بوده و به دلیل ریز بودن ذرات به آسانی در تمام طول راکتور منبسط می شود اما با پیشرفت تولید گرانول و سنگین تر شدن ذرات، ته نشینی دانه های بزرگ تر، در قسمت انتهایی منطقه راکتور و انبساط دانه های کوچک تر، در قسمت های بالاتر طبقه بندی می گردند.

وقتی در نهایت تولید گرانول کامل شود در ناحیه واکنش، یک بستر لجنی چگال و ساکن^۱ و یک پوشش لجنی شناور^۲ با فصل مشترک مشخص بین آنها تشکیل می گردد. مصرف رشد مایه در قسمت پایین راکتور به مراتب بیشتر است و در نتیجه رشد باکتری به صورت فزاینده ای در آن قسمت شدیدتر شده و متعاقباً تولید و رشد گرانول را باعث می شود. در حالت پایدار و پس از تشکیل گرانول ها، زمان ماند لجن در راکتور UASB به بالاتر از ۳۰ روز می رسد در حالی که زمان ماند هیدرولیکی می تواند در محدوده ۳ ساعت تا ۳ روز تغییر نماید [۹].

مشخصات لجن موجود درون راکتور، کمک زیادی به بهینه کردن فرایند گرانوله شدن می نماید. مشخصات لجن شامل نسبت VSS/SS موجود در لجن، حجم ویژه لجن، چگالی، سرعت ته نشینی و مقدار فلزات، در راکتورهای مختلف و بار گذاری های متفاوت مقایسه گردیده است. نتایج به دست آمده توسط گانگرکار و همکاران^۳ نشان داده است که محدوده ۲-۴/۵ kgCOD/m³d برای بار آلی و ۰/۱-۰/۳۵ kgCOD/kgVSSd با حفظ شرایط مطلوب برای بار لجن، بهترین حالت برای گرانوله شدن است [۱۰]. بین ۲۰ تا ۳۰ روز زمان لازم است تا راکتور به شرایط بهینه پایا برسد. لجنی که قطر گرانول های آن بیشتر است و چگالی بالاتری دارد، از سرعت ته نشینی بالاتری برخوردار است. سرعت ته نشینی درون این راکتورها در محدوده ۲-۹۰ متر بر ساعت تغییر می کند. برای اینکه سرعت ته نشینی در مرحله راه اندازی و تشکیل گرانول مناسب باشد، OLR نباید از ۴/۵ kgCOD/m³d و SLR از ۲/۵ kgCOD/kgVSSd تجاوز نماید. در غیر این صورت، سرعت

ته نشینی کمتر از حد مطلوب می شود. مصرف کلسیم در محدوده ۴۰ تا ۶۰ و منیزیم بین ۳۲ تا ۵۷ میلی گرم برای هر گرم لجن جامد خشک مشاهده شده است [۱۰].

برای ته نشینی بهتر لجن باید حدود ۲۰ تا ۲۵ میلی گرم بر گرم خاکستر درون لجن خشک موجود باشد. برای رسیدن به بالاترین راندمان، کلسیم ۶۰ میلی گرم بر گرم و منیزیم ۱۰۰ میلی گرم بر گرم مورد نیاز است.

۳-۲-۱- مقدار بار آلی

در رابطه با فرایند تولید گرانول، سه فاز قابل تشخیص است: فاز ۱- مقدار بار آلی کمتر از ۲ کیلوگرم COD بر متر مکعب در روز؛ در این فاز، بستر لجنی به طور مشخص توسعه می یابد که نتیجه آن، شروع تولید گاز و افزایش مقدار بار آلی مورد استفاده است. رشد ارگانسیم های رشته ای سبب کاهش قابلیت ته نشینی لجن می گردد.

فاز ۲- مقدار بار آلی در محدوده ۲ تا ۵ کیلوگرم COD بر متر مکعب در روز؛ در این مرحله در اثر ادامه و افزایش مقدار بار آلی و تولید گاز، فرار لجن معلق به وجود می آید. سیستم UASB به طور آشکار یک انتخاب را بین اجزای لجن انجام می دهد به طوری که ذرات سنگین تر را حفظ کرده و به سرعت رشد می دهد. تشکیل گرانول های مجزا تا قطر ۵ میلی متر نتیجه این مرحله است.

فاز ۳- مقدار بار آلی بیشتر از ۵ کیلوگرم COD بر متر مکعب در روز؛ در این فاز، افزایش خالص در مقدار کلی لجن روی می دهد و مقدار بار می تواند تا حداکثر میزان خود افزایش یابد [۹].

۳-۳- شرایط محیطی

۳-۳-۱- نوع و ترکیب فاضلاب

نوع فاضلاب در مقایسه با نرخ بار و طراحی راکتور، تأثیر بیشتری بر خواص توده لجن دارد. نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که هرچه خوراک از کربوهیدرات های سبک تری تشکیل شده باشد، رشد و ایجاد زیست لایه بهتر صورت می پذیرد. مشخص شده است که حضور ترکیبات یونی و مواد مغذی لازم برای تشکیل گرانول ها در فاضلاب سبب بهبود فرایند گرانوله شدن می شود. همچنین تفاوت در منبع کربن فاضلاب سبب تغییر تدریجی در ساختار فیزیکی و توزیع باکتری در لجن گرانوله هسته می گردد که سبب تجزیه و یا شناور شدن آن می شود. شدت چنین تغییراتی نسبتاً آرام بوده و به مقدار بار لجن بستگی دارد. تشکیل گرانول ها با فاضلاب کارخانه تولید شکر در مقدار بار لجن حتی بیشتر از ۰/۶ کیلوگرم COD بر کیلوگرم VSS در روز، به راحتی حاصل می گردد ولی با فاضلاب کشتارگاه، گرانول تشکیل نمی شود و حتی گرانول تشکیل شده در

¹ Sludge Bed

² Sludge Blanket

³ Ghangerkar et al.

فاضلاب کارخانه شکر، با قرارگرفتن در معرض فاضلاب کشتارگاه تجزیه می‌شود [۱۱].

۳-۳-۲- نقش غلظت رشد ماهی

مقدار بهینه غلظت COD ورودی به راکتور UASB، ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر است. غلظتهای بالاتر باید با استفاده از جریان برگشتی، رقیق شود. همچنین کاهش غلظت اسیدهای چرب فرار به کمتر از ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر در راکتور، برای تشکیل لجن گرانوله با استحکام بالاتر و افزایش بازدهی دفع COD مطلوب است. به علاوه نسبت VSS/SS لجن در محدوده ۰/۴ تا ۰/۶ برای عملکرد بهتر راکتور در طول فرایند گرانوله شدن از لجن هسته غیرگرانوله مطلوب است [۶].

فعالیت متان‌زایی لجن با تغییر غلظت COD جریان ورودی، تغییر می‌نماید. گرانول‌هایی که در جریان ورودی غلیظ رشد می‌کنند، دارای فعالیت متان‌زایی بالایی هستند. در حالی که اگر گرانول در غلظت پایین رشد ماهی رشد کند، فعالیت متان‌زایی آن کم است. فعالیت متان‌زایی گرانول‌ها به‌طور یکنواخت با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. همچنین اندازه گرانول‌های متان‌زا در راکتور UASB به غلظت رشد ماهی و ورودی بستگی دارد. گرانول‌های بزرگ‌تر با استفاده از رشد ماهی با غلظت بالا به‌دست می‌آیند. در حالی که رشد ماهی با غلظت کم، منجر به تولید گرانول کوچک و گاهی تجزیه گرانول می‌گردد.

تعداد زیاد گرانول‌های کوچک در راکتور UASB احتمالاً نقش مهمی به‌عنوان هسته در فرایند گرانولاسیون ایفا می‌کند. دلیل افزایش اندازه متوسط قطر گرانول با افزایش غلظت را می‌توان تا حدودی توجیه نمود. در غلظت بالای رشد ماهی در جریان ورودی، رشد ماهی به مرکز ذرات نفوذ می‌یابد و این نفوذ تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که کمبود در مرکز گرانول ایجاد شود. این کمبود منطقه‌ای رشد ماهی باعث کاهش رشد باکتری و در نهایت پوسیدگی گرانول می‌شود. کاهش غلظت رشد ماهی در مرکز گرانول احتمالاً منجر به کاهش اندازه به‌وسیله نیروی تنش می‌شود و تعادل دینامیکی بین رشد و تجزیه ایجاد می‌گردد. وقتی غلظت رشد ماهی کمتر باشد، باعث کمبود بیشتر منطقه‌ای رشد ماهی شده که منجر به ایجاد تعادل جدید در اندازه متوسط کوچک‌تر می‌شود [۱۱].

۳-۳-۳- تأثیر مکمل‌سازی با مواد مغذی

مواد مغذی را می‌توان به دو دسته درشت‌مغذی^۱ها^۱ نظیر نیتروژن، فسفر، کلسیم و سدیم، و ریزمغذی^۲ها^۲ نظیر آهن، کبالت و نیکل

تقسیم‌بندی نمود. در مورد فاضلاب تولید الکل^۳، مکمل‌سازی با درشت مغذی‌ها منجر به کاهش در تولید گاز و کارایی حذف COD می‌شود. مکمل‌سازی با کلسیم به تنهایی و یا همراه با فسفات، در مقایسه با فسفات تنها، زیان بیشتری برای تولید گاز و حذف COD دارد. تأثیر زیان‌بار کلسیم و فسفات ممکن است به‌دلیل pH کم (کمتر از ۵) این نوع فاضلاب باشد. لجن حاصل از مکمل‌سازی با فسفات، بیشترین فعالیت متانوژنیک را بر رشد ماهی‌های متفاوت نشان می‌دهد.

همچنین افزودن فسفات و کلسیم به فاضلاب تولید الکل برای کیفیت ته‌نشینی لجن مضر است، اگرچه غلظت کمی از فسفات (۱ گرم در لیتر) فعالیت متانوژنیک لجن را بهبود می‌بخشد. ریزمغذی‌ها، هم فعالیت متانوژنیک و هم قابلیت ته‌نشینی لجن را افزایش می‌دهند. افزودن نمک‌های آهن، کبالت و نیکل به میزان ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر به فاضلاب تولید الکل، برای هضم بی‌هوازی آن مفید است. مکمل‌سازی توسط ریزمغذی‌ها، کاهش در SVI لجن را به‌دنبال دارد. کم‌ترین SVI در حالت ترکیبی از آهن و نیکل مشاهده شده است [۱۲].

مطالعات نشان می‌دهد که در راکتورهای UASB، افزودن یون آلومینیوم با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، زمان گرانوله شدن لجن را حدوداً یک ماه کاهش می‌دهد. راکتوری که به آن یون آلومینیوم به‌صورت کلرید آلومینیوم افزوده شود، بیشترین غلظت زیست‌توده را در طول آزمایش دارد [۹].

جذب کلسیم به‌میزان ۶۰ میلی‌گرم جامد خشک^۴ و جذب مخلوط کلسیم و منیزیم بر حسب کلسیم به‌اندازه بالاتر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر گرم جامد خشک برای ایجاد لجن گرانوله سودمند است [۱۳].

جذب سدیم، بیشتر از ۲۰ تا ۲۵ میلی‌گرم بر گرم جامد خشک، اثر منفی بر خواص لجن دارد و در نتیجه باعث بازدهی منفی در حذف COD می‌شود [۱۳].

۳-۳-۳-۱- اثر غلظت کلسیم

کاتیون‌های دوظرفیتی اثر مثبتی بر لخته‌شدن دارند. خروج لجن در طی فاز اولیه راه‌اندازی را می‌توان با افزایش غلظت یون کلسیم در خوراک کاهش داد. در گرانول‌هایی با غلظت بالای یون کلسیم، بیشتر باکتری‌های نوع سارسینا دیده شده‌اند.

افزایش خروج لجن در این غلظتها احتمالاً در نتیجه تشکیل مقادیر زیاد کریستال‌های کوچک کربنات کلسیم است که محرک رشد پراکنده و به‌صورت یک حامل برای باکتری‌ها است. از سوی

³ Distillery Effluent

⁴ Gram Dry Solid

¹ Macro Nutrients

² Micro Nutrients

دیگر قابلیت آبگریزی و بار سطحی نیز اهمیت دارند و هر دو در پایداری گرانول مؤثر هستند. تغییر در بار سطحی با حذف کلسیم، احتمالاً منجر به کاهش استحکام گرانول و حتی در بعضی از موارد تجزیه کامل گرانول می‌گردد.

بررسی‌های صورت‌گرفته نشان داد که افزودن یون کلسیم در غلظتهای ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در راکتورهای UASB به همراه خوراکی با COD حدود ۴۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، تجمع زیست توده و فرایند گرانول سازی را افزایش می‌دهد. غلظت کلسیم در گرانول‌ها با غلظت کلسیم فاضلاب متناسب است. کربنات کلسیم اصلی‌ترین رسوب کلسیم در گرانول‌هاست. فعالیت ویژه گرانول‌ها، با افزایش غلظت کلسیم در خوراک کاهش می‌یابد. برای غلظتهای بالای کلسیم، مقدار زیادی از مواد معدنی درون گرانول‌ها رسوب می‌دهد. این موضوع همراه با کاهش زیاد در محتوای آب گرانول‌ها و سمیت بالای غلظت کلسیم تجمع‌یافته درون گرانول‌ها، فعالیت ویژه باکتریایی کمتری را موجب می‌شود. به‌طور کلی افزودن غلظت کمی از کلسیم به راکتورهای UASB به‌طور مناسبی سه مرحله گرانوله شدن لجن شامل جذب سطحی، چسبندگی و تکثیر را افزایش و بهبود می‌بخشد [۱۰].

۳-۳-۲- تأثیر غلظت سولفات

اگرچه حضور ترکیبات گوگردی برای واکنش‌های زیستی ضروری است و تا ۳۵ درصد محتوای معدنی گرانول‌ها را تشکیل می‌دهد، ولی غلظت بالای سولفات در خوراک سبب اثرات بازدارندگی بر روی راکتورهای بی‌هوازی و واحدهای مربوطه می‌شود. علاوه بر این، سولفید تولیدشده به‌علت رشد باکتری اکسیدکننده سولفید، موجب توده‌ای شدن لجن در واحد تصفیه تکمیلی لجن فعال می‌گردد. اثرات بازدارندگی یون سولفات بسته به واکنش‌های مختلفی که ممکن است رخ دهد، متفاوت است. به‌عنوان مثال فلزات سنگین که فعالیت باکتریایی را بهبود می‌بخشند، به‌سادگی توسط یون‌های سولفید حذف می‌شوند. همچنین یون‌های سولفات، رشد باکتری‌های کاهنده سولفات^۱ را تسریع نموده و قابلیت رقابت آن را با باکتری‌های تولیدکننده متان^۲ بهبود می‌بخشند. این درحالی است که دو گونه MPB به نام‌های متانوسارسینا و متانوثریکس تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی تشکیل گرانول دارند.

گرانوله شدن لجن توسط افزایش یون‌های سولفات، تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۱۴].

برای فاضلاب‌هایی مانند فاضلاب کارخانجات تولید الکل و کاغذسازی که حاوی غلظتهای بالای COD و یون‌های سولفات

هستند، اگرچه فرایند تصفیه بی‌هوازی ممکن است یک انتخاب مناسب باشد ولی غلظت بالای یون‌های سولفات مشکلاتی را برای گرانولاسیون لجن به‌وجود می‌آورد. کاهش سولفات توسط SRB، محصولات سمی تولید می‌نماید که اثرات منفی بر روی باکتری‌های بی‌هوازی می‌گذارد.

مقدار سمیت تولیدشده به عوامل مختلفی نظیر غلظت سولفات، pH، COD، جریان ورودی، دما و اندازه گرانول‌ها بستگی دارد. MPB نسبت به سایر گونه‌ها حساسیت بیشتری در برابر سمیت از خود نشان می‌دهد. اثر سمیت سولفید هیدروژن بر روی MPB در غلظتهای بالاتر از ۱۵ میلی‌گرم در لیتر اهمیت زیادی دارد. در غلظتهای بیشتر از این مقدار، افزایش ۱ میلی‌گرم در لیتر سولفید هیدروژن موجب از بین رفتن ۲/۰ درصد از فعالیت MPB می‌گردد. در غلظتهای کمتر از ۱۵ میلی‌گرم در لیتر سولفید هیدروژن فعالیت MPB تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد.

همچنین با افزایش غلظت سولفات در خوراک، میزان خروج لجن از راکتور افزایش می‌یابد که علت آن افزایش جمعیت SRB و تخریب دیواره سلولی MPB به‌دلیل اثر بازدارندگی و سمیت سولفید هیدروژن است که ممکن است عامل اصلی متلاشی شدن گرانول‌ها باشد [۱۵].

۴- نتیجه‌گیری

تشکیل گرانول از لجن بی‌هوازی و بقای آن تحت تأثیر عوامل زیادی از جمله هسته‌های رشد، شرایط عملیاتی و شرایط محیطی مانند بار لجن و بار آلی، مواد مغذی لازم، دما، pH، ترکیب و نوع فاضلاب است. یکی از عوامل ایجاد و رشد گرانول‌ها، حضور هسته‌ها برای اتصال میکروبی است. این هسته‌های رشد به‌صورت ذرات بی‌اثر و لجن گرانوله در راکتورهای UASB مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

راه‌اندازی، معمولاً سخت‌ترین و بی‌ثبات‌ترین فاز فرایند بی‌هوازی محسوب می‌شود و وظیفه اصلی آن ایجاد رشد یک لجن قابل ته‌نشینی بسیار فعال با حداکثر سرعت ته‌نشینی ممکن است. از آنجا که باکتری بی‌هوازی رشد آهسته‌ای دارد، مهم‌ترین مشکلی که در راکتور UASB وجود دارد، راه‌اندازی طولانی‌مدت راکتور و ایجاد خودبخودی گرانول‌هاست. زمان راه‌اندازی برای راکتورهای UASB با استفاده از لجن هضم‌شده معمولاً چندین ماه به طول می‌انجامد. زمان راه‌اندازی طولانی‌مدت، مهم‌ترین عامل بازدارنده در استفاده از سیستم UASB است.

واقعیت مهمی که باید در نظر گرفت این است که فرایند گرانولاسیون به شدت تابع رشد باکتری‌هاست. رشد باکتری‌ها به‌عوامل متعدد محیطی و عملیاتی نظیر وجود مواد مغذی لازم،

¹ Sulphate Reducing Bacteria (SRB)

² Methane Producing Bacteria (MPB)

pH، دما، ترکیب و نوع فاضلاب، غلظت رشد مایه، حضور
هسته‌های رشد، نرخ بار لجن و بار آلی بستگی دارد. با بهینه‌نمودن
شرایط به‌منظور رشد، می‌توان فرایند گرانوله شدن را به مقدار
زیادی بهبود بخشید.

۵- مراجع

- 1- Ramakrishnan, A., and Gupta, S.K. (2006). "Anaerobic biogranulation in a hybrid reactor treating phenolic waste." *J. of Hazardous Materials*, 137, 1488-1495.
- 2- Zhou, W., Imai, T., Ukita, M., Sekine, M., and Higuchi, T. (2005). "Triggering forces for anaerobic granulation in UASB reactors." *Process Biochemistry*, 41, 36-43.
- 3- Jeong, H.S., Kim, Y.H., Yeom, S.H., Song, B.K., and Lee, S.I. (2004). "Facilitated UASB granule formation using organic-inorganic hybrid polymers." *Process Biochemistry*, 40, 89-94.
- 4- Li, J., Hu, B., Pingm, Z., Qaisar, M., and Mei, L. (2007). "Filamentous granular sludge bulking in a laboratory scale UASB reactor." *Bioresource Technology*, 99, 3431-3438.
- 5- Shayegan, J., Yousefnejad, M. S., and Hemmati, A. (2010). "A survey of sludge granulation theories under anaerobic conditions." *J. of Water and Wastewater*, 76, 44-55. (In Persian)
- 6- Bhunia, P., and Ghangrekar, M.M. (2007). "Required minimum granule size in UASB reactor and characteristics variation with size." *Bioresource Technology*, 98, 994- 999.
- 7- Mehdizadeh, H., and Shayegan, J. (2003). "The effect of sulfate concentration on COD removal and sludge granulation in UASB reactors." *J. Iran Chem. Eng.*, 16(1),1-9.
- 8- Yu, H.Q., Tay, J.H., and Fang, H.H.P. (1999). "Effects of added powdered and granular activated carbons on start-up performance of UASB reactors." *Environ. Technol.*, 20, 1095-1101.
- 9- Yan, Y. G., and Tay, J. H. (1997). "Characterization of the granulation process during UASB start-up." *Water Research*, 31(1), 1573 - 1580.
- 10- Ghangrekar, M. M., Asolekar, S.R., and Joshi, S.G. (2005). "Characteristics of sludge developed under different loading conditions during UASB reactor start-up and granulation." *Water Research*, 39(6), 1123-1133.
- 11- Holshaff, L. W. (1983). "Granulation in UASB Reactors." *Water Res. Tech.*, 15, 291-304.
- 12- Sharma, J., and Singh, R. (2001). "Effect of nutrients supplementation on anaerobic sludge development and activity for treating distillery effluent." *Bioresource Technology*, 79, 203-206.
- 13- Yu, H.Q., Fang, H.H.P., and Tay, J.H. (2001). "Enhanced Sludge granulation in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor by aluminum chloride." *Chemosphere*, 44, 31-36.
- 14- Yu, H.Q., Tay, J.H., and Fang, H.H.P. (2001). "The roles of calcium in sludge granulation during UASB reactor start-up." *Water Research*, 35 (4), 1052- 1060.
- 15- Taheri Shahraini, H. (2000). "Stability of thermophilic up- flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor with temperature shocks." *J. of Water and Wastewater*, 35, 2-8. (In Persian)

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



مقاله نویسی علوم انسانی



اصول تنظیم قراردادها



آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله