عوامل مؤثر بر گرانوله شدن لجن در شرایط بی‌هوازی

جلال شایگان [۱] آزاده همتی [۲] محمد صالح یوسف‌نژاد کبریا [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 بی اثر 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 Shayegan[1] *Azadeh Hemati[2]* *Mohammad Saleh YousefnejadKebria[2]*

(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.

۱- استاد گروه مهندسی محیط زیست، دانشکدهٔ مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران (نویسندهٔ مسئول) ۶۶۱۶۵۴۲۰(۰۲۱)، shayegan@sharif.edu

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکدهٔ مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

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- مقدمه

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[1] 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 سمّی 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. جونگ و همکاران[2] 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 ساختار میکربی قوی و متراکم، از سرعت ته‌نشینی خوبی برخوردارند. بنابراین زمان اقامت زیست توده[3] در راکتورهای UASB بیشتر از راکتورهای زیستی دیگر است. این گرانول‌ها دارای آستانه سمیّت 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 به‌خوبی سازگار می‌شود.

اکثر فرضیات ارائه شده در مورد تولید گرانول، بر این موضوع تأکید دارند که باکتری *استوتروفیک* و متانوژن *متانوتریکس*[4] نقش کلیدی در فرایند گرانوله شدن لجن ایفا می‌نماید. عده‌ای از پژوهشگران نیز معتقدند که باکتری *متانوسارسینا*[5] تشکیل گرانول را بهبود می‌بخشد. توافق قابل ملاحظه‌ای برروی 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[6] 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 نسبت‌به فرم لخته‌ای است. فعالیت ویژه متانوژنیک برای لجن گرانوله در محدوده ۰/۳ تا ۱/۲ گرم CH_4 بر گرم VSS در روز و برای یک لجن گرانوله خوب نیز، بیش از ۲ گرم CH_4 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 به‌جای وابستگی به جرم ذره، به‌مقدار زیادی به ویسکوزیته محیط وابسته است. بنابراین ایجاد هرگونه آشفتگی و تلاطم در سیستم که به‌وسیله 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

[1] Solid Retention Time (SRT)
[2] Jeong et al.
[3] Biomass
[4] *Methanothrix Soehngenil*
[5] *Methanosarcina*
[6] *Image Analysis Technique*

رینولدز بزرگ‌تر از ۱ است. یعنی در این ذرات، ته‌نشینی به‌وسیله نیروی اینرسی کنترل می‌شود نه نیروی ویسکوزیته محیط اطراف. سرعت ته‌نشینی چنین گرانول‌هایی حدود ۹ متر بر ساعت و در حالت پایدار بزرگ‌تر از ۳۰ متر بر ساعت است که خیلی بیشتر از سرعت حرکت فاضلاب در راکتور است. بنابراین براساس عدد رینولدز و سرعت ته‌نشینی، قطر بیوذرات با وزن مخصوص ۱/۰۳۵، باید بزرگ‌تر از ۰/۴۵ میلی‌متر باشد [۶].

۳- عوامل مؤثر بر گرانوله شدن

تشکیل گرانول از لجن بی‌هوازی و بقای آن تحت تأثیر عوامل زیادی است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

۱- حضور هسته‌های رشد به‌صورت ذرات بی‌اثر یا لجن گرانوله

۲- شرایط عملیاتی فرایند طی مرحله راه‌اندازی نظیر بار لجن[1] و بار آلی[2]، روند افزایش نرخ بار، شرایط هیدرودینامیکی و مقدار هسته‌های رشد مورد استفاده.

۳- شرایط محیطی مانند وجود مواد مغذی لازم به‌منظور بهینه نمودن شرایط رشد باکتری، دما به‌علت 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 تجزیه‌پذیری مواد آلی و غیرآلی توسط موجودات ذره‌بینی، ترکیبات یونی شامل غلظت کاتیون‌هایی نظیر کلسیم، سدیم و آلومینیوم، حضور ترکیبات بازدارنده و غلظت رشد مایه. نشان داده شده است که در برخی موارد، رشد گرانول‌ها در شرایط دمایی خاص در راکتور امکان‌پذیر است. به‌عنوان مثال در یک نمونه پس از کاهش تدریجی دما طی چهار روز و افزایش ناگهانی آن طی ۱۲ ساعت (اعمال نوعی شوک به باکتری‌ها)، گرانول‌هایی با قطر حدود ۱ میلی‌متر تشکیل شد [۷].

۳-۱- بهبود شرایط گرانوله شدن از طریق هسته‌های رشد

یکی از عوامل کمک‌کننده در ایجاد و رشد گرانول‌ها از لجن معلق، حضور هسته‌ها با حامل‌های زیستی[3] به‌منظور اتصال میکربی است. این هسته‌های رشد به‌صورت ذرات بی اثر و لجن گرانوله در راکتورهای UASB مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۱-۱- ذرات بی اثر

اتصال موجودات ذره‌بینی به این ذرات به‌عنوان مرحله آغازین گرانوله شدن، پیشنهاد شده است. ازآنجا که مرحله دوم، تشکیل یک زیست لایه (بیوفیلم) متراکم و ضخیم بر روی ذرات بی‌اثر است، این مرحله را می‌توان به‌عنوان مرحله تشکیل زیست لایه مورد بررسی قرار داد. به‌عبارت دیگر، زمانی‌که مجموعه‌های آغازین تشکیل شدند، فرایند گرانوله شدن که در ادامه رخ می‌دهد را می‌توان به‌صورت پدیده افزایش ضخامت زیست لایه تلقی نمود. به این دلیل، فرایند گرانوله شدن لجن در راکتورهای UASB با افزودن ذرات بی‌اثر را می‌توان به‌عنوان یک پدیده تشکیل زیست لایه تعبیر نمود. یو و همکاران[4] رهنمودهای زیر را برای انتخاب آگاهانه و دقیق مواد بی‌اثر برای بهبود گرانوله شدن لجن پیشنهاد داده‌اند [۸].

۱- سطح مخصوص بالا

۲- وزن مخصوص مشابه با لجن بی‌هوازی

۳- قدرت آبگریزی خوب

۴- شکل کروی.

محققان زیادی تأثیر ذرات بی‌اثر بر روی گرانوله شدن را مورد مطالعه قرار داده‌اند. همچنین اهمیت ذرات نگهدارنده بی‌اثر در فرایند گرانوله شدن اثبات شده است. زمانی‌که ذرات بی‌اثر با اندازه‌ای در حدود ۴۰ تا ۱۰۰میکرومتر از فاضلاب حذف می‌شوند، گرانولاسیون در دوره زمانی مورد انتظار(زمان گرانولاسیون لجن پراکنده و بدون حذف ذرات بی‌اثر)، رخ نمی‌دهد. ازجمله مواد بی‌اثری که با استفاده از آن‌ها می‌توان گرانوله شدن لجن را سرعت بخشید، عبارت‌اند از اسفنج، زئولیت، هیدروآنتراسیت، پلیمر جذب‌کننده آب (WAP)، کربن فعال گرانوله (GAC) و کربن فعال پودری شکل(PAC).

غلظت بالای مواد معلق که خاصیت لخته‌شدن ضعیفی دارند نیز برای ایجاد لجن گرانوله مضر است. همچنین در فاضلابهای رقیق با مقادیر زیاد جامدات معلق بسیار پراکنده، اتصال باکتری‌ها به ذرات پراکنده می‌توانند منجر به از بین رفتن و خارج شدن باکتری‌های کارآمد از درون راکتور شود. غلظت بالای جامدات بی‌اثر پراکنده برای فرایند گرانوله شدن زیان‌آور است زیرا در حالتی که مساحت سطح ارائه شده برای رشد باکتری‌های موجود بسیار بزرگ باشد، رشد متراکم محدود خواهد شد. ازآنجاکه فرایند گرانوله شدن، به‌شدت تابع رشد باکتریایی است، یک رشد کم، سبب ایجاد افت و نقصان در فرایند گرانولاسیون می‌گردد.

۳-۱-۲- لجن گرانوله

ازآنجا که لجن گرانوله شامل مقادیر زیادی از زیست‌توده متانوژنیک فعال است، اضافه‌کردن 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 میکروارگانیسم‌های 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 به‌دنبال 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 به‌میزان 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 طولانی مدت، مهم‌ترین عامل بازدارنده در استفاده از سیستم UASB است.

نرخ بار به‌کار گرفته‌شده در راکتور، نقش بسیار مهمی در تشکیل گرانول‌های بی‌هوازی ایفا می‌نماید. به‌طوری‌که 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 به‌ترتیب ظرفیت راکتور بر واحد حجم و ظرفیت میکروارگانیسم‌ها بر واحد جرم موجود در راکتور را برای مصرف زیست‌مایه آلی تعریف می‌کنند. نرخ‌های به‌کار گرفته شده در طول تشکیل گرانول‌ها، مسئول میزان استحکام گرانول هستند به‌طوری‌که هرچه استحکام گرانول بیشتر باشد، کاهش COD بالاتری نتیجه می‌شود. ایجاد لجن گرانوله با خصوصیات مطلوب نظیر شاخص حجمی لجن[1] 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. به‌دلیل 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 به‌سرعت 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[2] (SMA) به‌عنوان مبنای افزایش سرعت راه‌اندازی در نظر گرفته شده است. افزایش پلکانی SLR به‌صورت ۶۰ تا ۸۰ درصد مقدار متوسط SMA اندازه‌گیری‌شده، برای راه‌اندازی سریع و تولید گرانول به‌کار می‌رود. افزایش SMA اغلب بلافاصله بعد از شروع کار آغاز می شود. 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 نزدیک‌شدن آن به‌حالت 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 تشکیل‌شدن می‌نمایند و به آرامی شتاب می‌گیرند. گرانول‌های اولیه به‌سرعت 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 نزدیک‌شدن 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 به‌کار بردن SMA و متعاقباً SLR کم است. در این شرایط، خروج زیست توده به‌دلیل قابلیت ته‌نشینی کم لجن هسته، شدیدتر است. در نتیجه غلظت لجن در راکتور به آرامی کاهش می‌یابد تا بعد از یک ماه عملکرد به حداقل ۷ گرم VSS در لیتر یعنی ۱۲ درصد کم‌تر از لجن هسته اولیه برسد. با آغاز تولید گرانول، غلظت لجن به تدریج افزایش می‌یابد که ناشی از تولید شدیدتر زیست توده و خروج کمتر آن است. حداقل فرار لجن در راکتور UASB، ۱۰۰ میلی‌گرم VSS در لیتر است. غلظت لجن در ابتدای دوره راه‌اندازی به‌طور موقت ثابت بوده و به‌دلیل ریز بودن ذرات به آسانی در تمام طول راکتور منبسط می‌شود اما با پیشرفت تولید گرانول و سنگین‌ترشدن ذرات، ته‌نشینی دانه‌های بزرگ‌تر، در قسمت انتهایی منطقه راکتور و انبساط دانه‌های کوچک‌تر، در قسمت‌های بالاتر طبقه‌بندی می‌گردند.

وقتی در نهایت تولید گرانول کامل شود در ناحیه واکنش، یک بستر لجنی چگال و ساکن[1] و یک پوشش لجنی شناور[2] با فصل مشترک مشخص بین آنها تشکیل می‌گردد. مصرف رشد مایه در قسمت پایین راکتور به مراتب بیشتر است و درنتیجه رشد باکتری به‌صورت فزاینده‌ای در آن قسمت شدیدتر شده و متعاقباً تولید و رشد گرانول را باعث می‌شود. در حالت پایدار و پس از تشکیل گرانول‌ها، زمان ماند لجن در راکتور UASB به بالاتر از ۳۰ روز می‌رسد در حالی‌که زمان ماند هیدرولیکی می‌تواند در محدوده ۳ ساعت تا ۳ روز تغییر نماید [۹].

مشخصات لجن موجود درون راکتور، کمک زیادی به بهینه کردن فرایند گرانوله شدن می‌نماید. مشخصات لجن شامل نسبت VSS/SS موجود در لجن، حجم ویژه لجن، چگالی، سرعت ته‌نشینی و مقدار فلزات، در راکتورهای مختلف و بارگذاری‌های متفاوت مقایسه گردیده است. نتایج به‌دست آمده توسط گانگرکار و همکاران[3] نشان داده است که محدوده ۲-۴/۵ $kgCOD/m^3d$ 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 گرانول‌های آن بیشتر است و چگالی بالاتری دارد، از سرعت ته‌نشینی بالاتری برخوردار است. سرعت ته‌نشینی درون این راکتورها در محدوده ۲-۹۰ متر بر ساعت تغییر می‌کند. برای اینکه سرعت ته‌نشینی در مرحله راه‌اندازی و تشکیل گرانول مناسب باشد، OLR نباید از ۴/۵ $kgCOD/m^3d$ و SLR از ۲/۵ kgCOD/kgVSSd تجاوز نماید. در غیر این صورت، سرعت ته‌نشینی کمتر از حد مطلوب می‌شود. مصرف کلسیم در محدوده ۴۰ تا ۶۰ و منیزیم بین ۳۲ تا ۵۷ میلی‌گرم برای هر گرم لجن جامد خشک مشاهده شده است [۱۰].

برای ته‌نشینی بهتر لجن باید حدود ۲۰ تا ۲۵ میلی‌گرم بر گرم خاکستر درون لجن خشک موجود باشد. برای رسیدن به بالاترین راندمان، کلسیم ۶۰ میلی‌گرم بر گرم و منیزیم ۱۰۰ میلی‌گرم بر گرم موردنیاز 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 به‌طور مشخص توسعه می‌یابد که نتیجه آن، شروع تولید گاز و افزایش مقدار بار آلی مورد استفاده است. رشد ارگانیسم‌های رشته‌ای سبب کاهش قابلیت ته‌نشینی لجن می‌گردد.

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 به‌وجود می‌آید. سیستم UASB به‌طور آشکار یک انتخاب را بین اجزای لجن انجام می‌دهد به‌طوری‌که ذرات سنگین‌تر را حفظ کرده و به‌سرعت رشد می‌دهد. تشکیل گرانول‌های مجزا تا قطر ۵ میلی‌متر 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 می‌دهد و مقدار بار می‌تواند 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 می‌دهد که هرچه خوراک از کربوهیدرات‌های سبک‌تری تشکیل شده باشد، رشد و ایجاد زیست لایه بهتر صورت می‌پذیرد. مشخص شده است که حضور ترکیبات یونی و مواد مغذی لازم برای تشکیل گرانول‌ها در فاضلاب سبب بهبود فرایند گرانوله شدن می‌شود. همچنین تفاوت در منبع کربن فاضلاب سبب تغییر تدریجی در ساختار فیزیکی و توزیع باکتری در لجن گرانوله هسته می‌گردد که سبب تجزیه و یا شناورشدن آن می‌شود. شدت چنین تغییراتی نسبتاً آرام بوده و به‌مقدار بار لجن بستگی دارد. تشکیل گرانول‌ها با فاضلاب کارخانه تولید شکر در مقدار بار لجن حتی بیشتر از ۰/۶ کیلوگرم COD بر کیلوگرم VSS در روز، به‌راحتی حاصل می‌گردد ولی با فاضلاب کشتارگاه، گرانول تشکیل نمی‌شود و حتی گرانول تشکیل‌شده 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 مایه

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 فرّار 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 مایه 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 رشدمایه ورودی بستگی دارد. گرانول‌های بزرگ‌تر با استفاده از رشد مایه با غلظت بالا به‌دست می‌آیند. در حالی که رشد مایه با غلظت کم، منجربه 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 مایه در جریان ورودی، رشد مایه به مرکز ذرات نفوذ می‌یابد و این نفوذ تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که کمبود در مرکز گرانول ایجاد شود. این کمبود منطقه‌ای رشد مایه باعث کاهش رشد باکتری و در نهایت پوسیدگی گرانول می‌شود. کاهش غلظت رشد مایه در مرکز گرانول احتمالاً منجربه کاهش اندازه به‌وسیله نیروی تنش می‌شود و تعادل دینامیکی بین رشد و تجزیه ایجاد می‌گردد. وقتی غلظت رشد مایه کمتر باشد، باعث کمبود بیشتر منطقه‌ای رشد مایه شده که منجربه ایجاد تعادل جدید در اندازه متوسط کوچک‌تر می‌شود [۱۱].

۳-۳-۳- تأثیر مکمل‌سازی با مواد مغذی

مواد مغذی را می‌توان به دو دستهٔ درشت‌مغذی‌ها[1] نظیر نیتروژن، فسفر، کلسیم و سدیم، و ریزمغذی‌ها[2] نظیر آهن، کبالت و نیکل تقسیم‌بندی نمود. در مورد فاضلاب تولید الکل[3]، مکمل‌سازی با درشت مغذی‌ها منجربه 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 مایه‌های 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[4] 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

[1] Macro Nutrients
[2] Micro Nutrients
[3] Distillery Effluent
[4] Gram Dry Solid

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 زیست‌توده 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 سمیّت 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].

۳-۳-۳-۲- تأثیر غلظت سولفات

اگرچه حضور ترکیبات گوگردی برای واکنش‌های زیستی ضروری است و تا ۳۵درصد 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 تصفیهٔ 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[1] را تسریع نموده و قابلیت رقابت آن را با باکتری‌های تولیدکننده متان[2] بهبود می‌بخشند. این درحالی است که دو گونهٔ MPB به نام‌های *متانوسارسینا* و *متانوتریکس* تأثیر قابل ملاحظه‌ای برروی 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 سمّی تولید می‌نماید که اثرات منفی بر روی باکتری‌های بی‌هوازی می‌گذارد.

مقدار سمیّت تولیدشده به عوامل مختلفی نظیر غلظت سولفات، pH، COD جریان ورودی، دما و اندازه گرانول‌ها بستگی دارد. MPB نسبت‌به سایر گونه‌ها حساسیت بیشتری دربرابر سمیّت از خود نشان می‌دهد. اثر سمیّت 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 ۰/۲درصد 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 سمیّت 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 ازجمله 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 میکربی 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. ازآنجا 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 طولانی مدت، 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، دمـا، ترکیـب و نـوع فاضـلاب، غلظـت رشـد مایـه، حـضور هسته‌های رشد، نرخ بار لجن و بار آلی بستگی دارد. با بهینـه‌نمـودن شرایط به‌منظور رشـد، مـی‌تـوان فراینـد گرانولـه شـدن را بـه مقـدار 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)