

# عوامل مؤثر بر گرانوله شدن لجن در شرایط هوازی

سجاد جلالی<sup>۱</sup>

جلال شایگان<sup>۲</sup>

سمیرا رضاسلطانی<sup>۱</sup>

(دریافت ۹۲/۳/۶)

(پذیرش ۹۲/۹/۲۲)

## چکیده

فناوری لجن گرانوله یکی از دستاوردهای مهم بیوتکنولوژی محیط زیستی در تصفیه فاضلاب و شامل گرانوله شدن هوازی و بی‌هوازی است. تاکنون مطالعات بسیاری بر روی جوانب مختلف گرانوله شدن بی‌هوازی و تشکیل و بهره‌برداری آن صورت گرفته و فرایند آن تا حد زیادی شناخته شده است. شناخت فرایند لجن گرانوله هوازی محدود به چند سال اخیر است که تحقیقاتی نیز در این مورد به شکل پراکنده بر روی عواملی مانند منبع آلی، نیروهای تنش هیدرولیکی، چرخه زمانی، زمان ته‌نشینی، ساختار راکتور، زمان ماند توده سلولی، اکسیژن محلول، غلظت یون فلزات و pH انجام شده است. در این مقاله تلاش شد که نتایج این تحقیقات به‌طور مختصر بیان و با بررسی و مقایسه آنها، مؤثرترین تحقیق مشخص شود. همچنین برای درک درست‌تر از فرایند گرانوله شدن، به مقایسه لجن گرانوله هوازی و غیر هوازی پرداخته شد.

**واژه‌های کلیدی:** گرانوله شدن هوازی لجن، راکتور SBR، فاکتورهای مؤثر بر گرانوله شدن هوازی

## A Survey on Sludge Granulation under Aerobic Conditions

S. Jalali<sup>1</sup>

J. Shayegan<sup>2</sup>

S. Rezasoltani<sup>1</sup>

(Received May 27, 2013 Accepted Dec. 13, 2013)

### Abstract

The sludge biogranulation technology, including the two aerobic and anaerobic processes, is an important development in the field of wastewater treatment. Much is known about the process and operation of the anaerobic granulation thanks to the rather large number of studies carried out. Aerobic granulation, however, has been only recently investigated and a limited number of studies have been dedicated to such aspects of the process as the organic source, hydrodynamic shear stress, cycle, settling time, reactor configuration, solid retention time, oxygen concentration, metallic concentration, and pH. This article tries to provide a brief review of these studies and the results obtained in an attempt to identify the most important study so far conducted. Using the results, a comparison will also be made between the anaerobic and aerobic granulation processes to gain a better understanding of both.

**Keywords:** Sludge Aerobic Granulation, SBR Reactor, Factors Involved in Aerobic Granulation.

1. Grad. MSc, Dept. of Chemistry and Petroleum Eng., Sharif University of Tech., Tehran  
2. Prof., Dept. of Chemistry and Petroleum Eng., Sharif University of Tech., Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 66165420 shayegan@sharif.edu

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

گرانول‌ها، امکان درک رفتار زیست توده برای تجمع و پایداری آنها بر اساس قوانین شناخته شده طبیعی را فراهم می‌آورد. این درک می‌تواند سنگ بنای لازم برای پیش‌بینی رفتار گرانول در شرایط مختلف را ایجاد کند. از سویی دیگر اگر نگاه ماکروسکوپیک و فرایندی برای عملی کردن این فناوری نیاز باشد، بررسی عوامل مؤثر مثل دما، غلظت ماده آلی و غیره می‌تواند اطلاعات لازم برای طراحی را مهیا کند. در دهه اخیر، تحقیقات زیادی برای درک تشکیل لجن گرانوله‌هوازی و عملکرد آن در راکتورهای SBR صورت گرفته است. برای تعیین اهمیت این عوامل و درک کلی از آنها نیاز است که این عوامل در کنار هم مورد بررسی قرار گیرند. در این تحقیق، این عوامل در کنار هم بیان شد و میزان اهمیت آنها نیز مورد بررسی قرار گرفت.

### ۱-۱- ساز و کار تشکیل گرانول هوازی

بر طبق نظر بیون و همکاران پس از تلقیح راکتور با زیست توده، قارچ‌ها شروع به رشد نموده و جمعیت غالب را تشکیل می‌دهند [۹]. قارچ‌ها به آسانی مایسل‌هایی را تشکیل می‌دهند که به خوبی ته‌نشین می‌شوند، اما از سویی دیگر، باکتری‌ها به دلیل عدم دارا بودن چنین امکانی به صورت کامل از راکتور شسته می‌شوند.

بنابراین در ابتدای بهره‌برداری، زیست توده موجود در راکتور، غالباً از قارچ‌ها تشکیل شده است. به خاطر وجود تنش سطحی در راکتور، باکتری‌های رشته از روی سطح گلوله‌های تشکیل شده جدا می‌شوند و گلوله‌های مترامی را تشکیل می‌دهند. گلوله‌ها تا قطر ۵ تا ۶ میلی‌متر رشد کرده سپس به خاطر کمبود اکسیژن خرد می‌شوند. در اثر خرد شدن، کلونی‌هایی از باکتری‌ها که بر روی ماتریس تشکیل شده‌اند، آزاد می‌شوند و تشکیل گرانول می‌دهند (شکل ۱).

### ۲- عوامل مؤثر بر تشکیل گرانول

#### ۱-۲- تأثیر منبع آلی

##### ۱-۱-۲- منبع کربن

با توجه به جدول ۱ گرانول‌های هوازی می‌توانند به‌طور موفقیت‌آمیزی با سوبستراهای مختلف شکل بگیرند. جدول ۱ نشان می‌دهد که با زمان ماند هیدرولیکی تقریباً یکسان، درصد حذف برای منابع کربنی مختلف تقریباً یکسان است. سازگاری قابل قبول گرانول‌های هوازی با فاضلاب‌های مختلف را می‌توان به امکان همزیستی گونه‌های مختلف میکروبی در گرانول‌ها مرتبط دانست. همچنین نتایج نشان می‌دهد که به واسطه گرادیان غلظتی که به‌طور معمول به خاطر مقاومت نفوذی در گرانول‌ها وجود دارد، سیستم گرانول‌سازی قابلیت بالایی برای حذف سموم دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگر فاضلاب شامل چند نوع

در طراحی بیوراکتورهای تصفیه زیستی، فعالیت متابولیکی مناسب جمعیت میکروبی همراه با غلظت بالای میکروارگانیسم‌ها و همچنین جداسازی زیست توده از پساب خروجی، همواره مسئله مورد بحث طراحان بوده است. برای نیل به این خواسته، روش‌های مختلفی از جمله استفاده از غشاها و تشکیل بیوفیلم، بررسی شده‌اند. در دهه گذشته توجه زیادی به توانایی گرانوله شدن میکروارگانیسم‌ها در محیط هوازی شده است. پتانسیل بالای نگهداری زیست توده در فرایند گرانول‌سازی هوازی موجب بهبود راندمان حذف در این سیستم‌ها می‌شود. از آنجایی که سرعت ته‌نشینی لجن گرانوله بیشتر از فلاک‌های لجن فعال است، راندمان جداسازی جامد-مایع در این سیستم‌ها بالاتر از سیستم‌های لجن فعال متعارف بوده و مشکل ته‌نشینی لجن نیز تا حدودی حل می‌شود.

از مزیت‌های دیگر فرایند گرانول‌سازی هوازی نسبت به سیستم لجن فعال متعارف می‌توان به سرعت بالای ته‌نشینی لجن گرانوله، قابلیت بالای نگهداری زیست توده، توانایی حذف همزمان مواد آلی و مغذی در یک راکتور، توانایی تحمل شوک‌های حاصل از مواد سمی نظیر فنل و لجن تولیدی کمتر اشاره نمود. این ویژگی‌های متمایز نشان‌دهنده برتری راکتور با لجن گرانوله هوازی نسبت به فرایند لجن متعارف است [۴-۱].

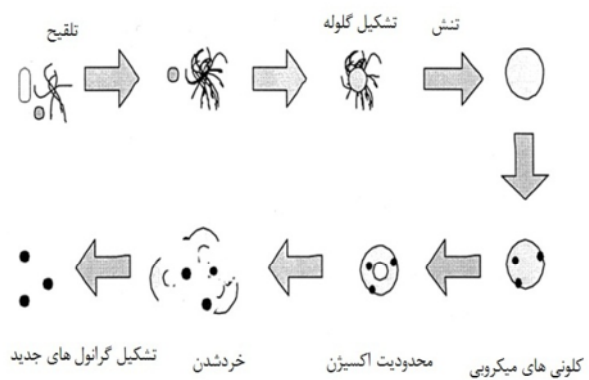
لجن گرانوله برای اولین بار به صورت گرانوله بی‌هوازی در دهه ۱۹۷۰ برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی در راکتورهای UASB مورد استفاده قرار گرفت. اگرچه راکتورهای UASB می‌توانند بارهای آلی قابل توجهی را تحمل کنند، اما معایب بسیاری از جمله طولانی بودن دوره راه‌اندازی، بالا بودن دمای بهره‌برداری، نامناسب بودن برای فاضلاب‌هایی با بار آلی پایین، پایین بودن بهره حذف نیتروژن و فسفر و شناور شدن لجن گرانوله به علت تولید بیوگاز در راکتور را نیز دارد [۵ و ۶]. در سال ۱۹۹۱ میلادی لجن گرانوله هوازی برای اولین بار در یک راکتور هوازی با جریان بالارونده (همانند USAB) به وسیله میشیما مشاهده و گزارش شد. مورگن راث برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ میلادی از یک راکتور SBR برای تولید لجن گرانوله هوازی استفاده نمود. او در تحقیق خود متوجه شد که مدت زمان تشکیل گرانول‌های هوازی در راکتور SBR به ۴۰ روز کاهش می‌یابد. از آن زمان به بعد از راکتور SBR به عنوان راکتور مناسب برای تشکیل لجن گرانوله هوازی استفاده شده است [۷].

برای راه‌اندازی و بهره‌برداری مؤثر فناوری لجن گرانوله هوازی باید ساز و کارهای تشکیل و همچنین عوامل مؤثر بر آن مشخص شوند. ساز و کار تشکیل گرانول‌ها (همانند روش ماکارونی برای گرانول‌های غیر هوازی [۸]) با نگاه میکروسکوپیک به تشکیل

دیده شد که نسبت غذا به میکروارگانیسم<sup>۲</sup> اثر مهمی بر سرعت گرانوله شدن و خصوصیات ریخت‌شناسی گرانول‌ها دارد. به‌طوری که نسبت بالای غذا به میکروارگانیسم، باعث تشکیل سریع‌تر گرانول‌های بزرگ و نسبت کمتر، منجر به تشکیل آهسته‌تر گرانول‌های کوچک‌تر می‌شود. نتایج پژوهش مذکور نشان داد که با افزایش این نسبت در راکتورها، اندازه گرانول‌ها به‌طور خطی از ۱/۲ تا ۴/۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد.

لیو به بررسی اثر غلظت ماده آلی بر لجن گرانوله‌سازی پرداخته و نتایج مشابه به‌دست آورده است [۴]. مشخص شد که با افزایش غلظت ماده آلی، اندازه گرانول‌ها افزایش می‌یابد. همچنین گرانول‌ها با افزایش غلظت ماده آلی، حالت پف کرده و کرکی مانند به خود می‌گیرند و در نتیجه دانسیته گرانول‌ها کاهش می‌یابد.

بیشتر پژوهش‌های انجام شده در زمینه گرانول‌های هوازی برای بارگذاری‌های آلی بین ۱ تا ۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب در روز صورت گرفته است. با این حال پژوهش‌هایی نیز در بارهای آلی کمتر از یک کیلوگرم بر متر مکعب در روز انجام شده که نشان داده است که تشکیل گرانول به‌خوبی صورت نمی‌گیرد [۲۳]. زیرا که تشکیل گرانول‌های هوازی دارای رشد سریع و نیازمند مقدار کافی سوبسترا در ورودی می‌باشند.



شکل ۷- نمودار تشکیل گرانول هوازی

آلاینده مختلف و سمی باشد، راکتور گرانوله‌قاپیلت آن را دارد تا به درصد حذف بالایی از مواد آلی برسد. لی و همکاران سه راکتور با غلظت زیست توده ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و شرایط عملیاتی یکسان راه‌اندازی کردند. آنها به راکتورها، غلظت‌های متفاوت گلوکز ۶۰۰ و ۱۴۰۰ و ۲۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اعمال کردند. به‌طوری که نسبت غذا به زیست توده در سه راکتور به‌ترتیب ۱/۱، ۰/۳، ۰/۷ گرم مواد معلق فرار بر گرم خاش بر روز<sup>۱</sup> شد [۲۲].

<sup>۱</sup> gVSS/g COD.d

<sup>۲</sup> F/M

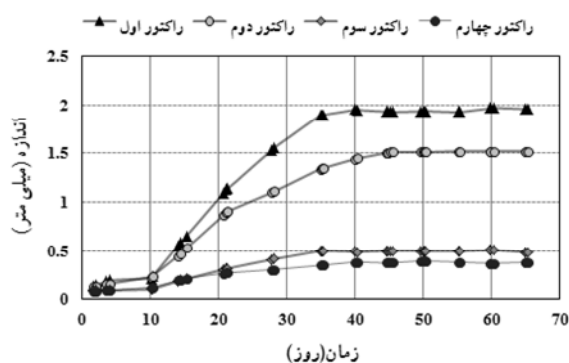
جدول ۱- منابع کربنی مختلف در راکتور گرانول هوازی غلظت منبع کربنی

مرجع	اندازه گرانول (میلی‌متر)	مدت بهره‌برداری (دقیقه)	زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)	درصد حذف	ماده
[۱۰]	۲-۱	۳۹	۸	۹۵-۹۴	۲ و ۴ دی کلرو فنول
[۹]	۳/۳	۲۴۵	۴	-	اتانول
[۱۱]	۱۰	۷۰	۸	۹۶	ساکاروز
[۲]	۰/۵	۷۰	۸	۹۷	فنل
[۱۲]	۲/۳	۷۰	۵/۵	۹۴	فاضلاب نساجی
[۱۳]	۰/۷	۱۴۰	۸	۹۲	فاضلاب شهری
[۱۴]	۲/۴	۲۴۰	۸	۹۷	گلوکز
[۱۴]	۱/۱	۲۴۰	۸	۹۸	استات
[۱۵]	۷-۲	۴۲	۶	۸۸/۷	آبجو
[۱۶]	۴-۲	۸۷	۴	۵۶	متیل بلو
[۱۷]	۲/۸-۱/۱	۳۰۷	۶	۷۳	فاضلاب خوک
[۱۸]	۱/۵	۹۰	۳	۹۶/۵	فاضلاب لاستیک سازی
[۱۹]	۳/۵-۰/۵	۴۰	۴/۵	۹۹/۵	فاضلاب کاغذسازی
[۲۰]	-	۳۴۰	۷/۵	۹۰	مواد دارویی (افلاکسین، نورفلاکسین، پیروفلاکسین)
[۲۱]	-	۴۴۴	۱۰/۵-۸	۱۰۰-۹۴	۲ فلرو فنول

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت کنترل سرعت بارگذاری در محدوده مشخصی (۱ تا ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب بر روز) می‌تواند موجب بهبود فرایند گرانول‌سازی شود. سرعت بارگذاری آلی باید بین محدوده قحطی و سیری سوبسترا برای گرانول‌ها قرار گیرد تا به این وسیله نیروی محرکه لازم برای خود تجمعی میکروبی فراهم شده و از طرف دیگر، گرانول‌های با پایداری بالا تشکیل شوند.

#### ۲-۱-۲- نسبت غلظت نیتروژن به ماده آلی

یانگ و همکاران به بررسی تأثیر افزایش نسبت نیتروژن به ماده آلی در فرایند لجن گرانوله‌سازی پرداخته‌اند [۲۴]. آنها چهار راکتور با میزان خاش ورودی ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و آمونیوم به ترتیب ۰.۲۵، ۰.۵۰، ۱.۰۰ و ۱.۵۰ میلی‌گرم در لیتر راه‌اندازی کردند. شکل ۲ تأثیر میزان نیتروژن بر اندازه گرانول‌ها را نشان می‌دهد. اندازه گرانول‌ها با افزایش نسبت نیتروژن به ماده آلی کاهش یافت.



شکل ۸- نمودار تأثیر نیتروژن بر اندازه گرانول‌ها [۲۴]

در این راکتورها مقدار شاخص حجمی لجن<sup>۱</sup> به ترتیب از راکتور اول تا چهارم برابر ۷۰، ۶۰، ۵۵ و ۵۰ میلی‌لیتر بر گرم بود. افزایش نسبت نیتروژن به ماده آلی موجب تحریک در تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی و بهبود اتصال باکتری‌ها در گرانول شده و با افزایش این نسبت، آبگریزی سلول نیز افزایش یافته است. از تحقیق آنها مشخص شد که نسبت نیتروژن به ماده آلی بر ماهیت گرانول‌ها و تشکیل آنها مؤثر است اما در سرعت تشکیل آنها بی‌تأثیر است.

#### ۲-۱-۳- نسبت غلظت فسفر به ماده آلی

لین و همکاران به منظور بررسی اثر فسفر بر تشکیل گرانول‌های از پنج راکتور SBR استفاده کردند [۲۵]. راکتورهای R1 تا R5 با غلظت خاش ورودی ۵۰۰ و فسفر ۵، ۱۲.۵، ۲۵، ۳۷/۵ و ۵۰

میلی‌گرم در لیتر خوراک‌دهی شدند. راکتورها در سیکل‌های شش ساعته و در بازه‌های زمانی پنج دقیقه زمان خوراک‌دهی، ۱۲۰ دقیقه واکنش غیرهوازی، ۲۲۶ دقیقه واکنش هوازی، پنج دقیقه ته‌نشینی لجن و چهار دقیقه تخلیه، مورد بهره‌برداری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نسبت فسفر به خاش در خوراک ورودی تأثیر زیادی بر روی ساختار گونه میکروبی می‌گذارد. به طوری که دانسیته میکروارگانیسم‌های ذخیره‌کننده فسفر<sup>۲</sup> بیشتر از دانسیته غیر ذخیره‌کنندگان<sup>۳</sup> می‌شود.

بر اثر تغییر در ساختار میکروبی، خواص ظاهری و فعالیت ریزاندامگان نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. تجمع فسفر در گرانول‌ها به طور معکوس با SOUR رابطه دارد؛ لذا فعالیت تنفسی<sup>۴</sup> پایین گرانول‌ها، تجمع فسفر در گرانول را بهبود می‌بخشد. همچنین با افزایش میزان فسفر در ورودی، گرانول‌هایی کوچک‌تر با ساختاری متراکم‌تر شکل گرفته و در نتیجه شاخص حجمی لجن کاهش پیدا می‌کند.

#### ۲-۲- تأثیر نیروهای تنش هیدرولیکی

نیروی تنش هیدرودینامیکی عمدتاً به وسیله هوادهی ایجاد و با سرعت بالارونده‌گاز توصیف می‌شود. تنش هیدرولیکی در راکتورهای زیستی یک عامل کلیدی است که تشکیل، ساختار و پایداری گرانول‌های میکروبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برخورد ناشی از حباب‌های هوای صعودکننده به ریزاندامگان سبب تماس بیشتر آنها به یکدیگر و تشکیل گرانول‌های هوازی متراکم با ساختاری منظم می‌شود.

تی و همکاران با مطالعه بر روی چهار راکتور SBR که با سرعت‌های هوای ظاهری ۰/۳، ۱/۲، ۲/۴، ۳/۶ سانتی‌متر بر ثانیه بهره‌برداری می‌شدند، سعی در بررسی تأثیر تنش هیدرولیکی در تشکیل گرانول‌های هوازی نمودند [۲۶]. نتایج تحقیقات نشان داد که در روز یازدهم در راکتورهای دوم تا چهارم، گرانول‌هایی با سطح خارجی منظم و ساختاری متراکم تشکیل شدند در حالی که در راکتور اول، در پایین‌ترین سرعت ظاهری هوا، هیچ گرانولی مشاهده نشد. نتایج کار آنها نشان داد که یک نیروی تنش کمیته برای گرانوله شدن هوازی لازم است. همچنین نیروهای تنش بالاتر باعث تحریک در تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی و افزایش خاصیت آبگریزی سلول می‌شود. پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی چسبندگی و اتصال سلول‌ها را تحت تأثیر قرار داده و نقش مهمی در ساختار یکپارچه سلول‌ها دارند. بنابراین تولید بیشتر

<sup>2</sup> P-Accumulating

<sup>3</sup> Non-P-Accumulating

<sup>4</sup> Respirometric

<sup>1</sup> Sludge Volume Index(SVI)

پلی ساکاریدهای خارج سلولی در نیروهای تنشی بالاتر باعث متراکم تر شدن ساختار گرانول ها می شود. افزایش آبریزی سطح سلول باعث کاهش در انرژی گیس و تولید ساختاری مستحکم در گرانول می شود.

### ۲-۳- تأثیر چرخه زمانی

چرخه زمانی برای بهره برداری از راکتور SBR شامل بازه های زمانی پرسازی، تخلیه، هوادهی (وابسته به زمان ماند هیدرولیکی) و ته نشینی است. عمده این چرخه زمانی به بازه هوادهی تعلق دارد که اساساً نشان دهنده زمان واکنش اکسایش سوپسترا و وابسته به زمان ماند هیدرولیکی است.

پن و همکاران با بهره برداری از پنج راکتور SBR با زمان های هیدرولیکی متفاوت، سعی در بررسی تأثیر این فاکتور بر تشکیل گرانول های هوازی داشتند [۲۷]. نتیجه پژوهش آنان نشان داد که رابطه شاخص حجمی لجن و زمان ماند هیدرولیکی، یک رابطه غیر خطی و دارای مقدار کمینه است. این رابطه غیر خطی نشان می دهد که با افزایش یا کاهش زمان ماند هیدرولیکی، مقدار شاخص حجمی لجن افزایش می یابد. مقدار کمینه بیانگر مقدار بهینه است که در زمان ماند هیدرولیکی تقریبی شش ساعت اتفاق می افتد. در زمان ماند ۲۴ ساعت، گرانول ها از هم گسیخته شده و با توده هایی با ساختار سست و قابلیت ته نشینی پایین جایگزین می شوند.

با افزایش زمان ماند هیدرولیکی، اندازه گرانول ها کاهش پیدا می کند. در زمان های ماند ۲، ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعت، قطر متوسط به ترتیب ۵/۳، ۲/۱، ۱/۱ و ۰/۷ بود. در حالی که گرانول های تشکیل شده در زمان های ماند پایین تر، دارای ساختاری متراکم تر بودند. آنها همچنین نشان دادند که آبریزی تابعی غیر خطی از زمان ماند هیدرولیکی است که بیشترین مقدار آن در زمان ماند شش ساعت حاصل می شود.

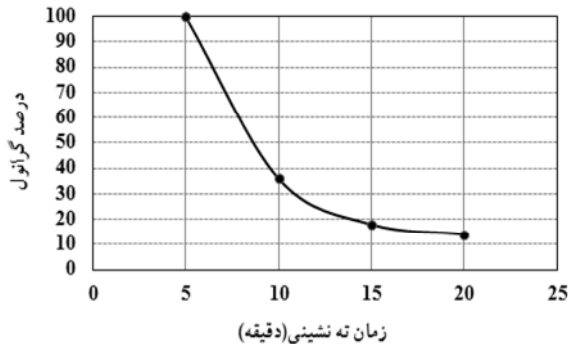
در نهایت زمان ماند هیدرولیکی ۲ تا ۱۲ ساعت منجر به تشکیل گرانول های هوازی پایدار شد. این محدوده از زمان ماند به اندازه کافی کوتاه برای جلوگیری از رشد لجن معلق و به اندازه کافی بلند برای جلوگیری از اتلاف لجن به واسطه شستن شدن<sup>۱</sup> از سیستم است.

### ۲-۴- تأثیر زمان ته نشینی در راکتورهای SBR

لجنی که توانایی ته نشین شدن در بازه زمانی ته نشینی را نداشته باشد، از طریق خروجی از سیستم شسته می شود. بنابراین زمان ته نشینی کوتاه، باعث باقی ماندن زیست توده با قابلیت ته نشینی

بالا در سیستم می شود. در زمان های ته نشینی بالاتر، توده های لجن با خاصیت ته نشینی ضعیف نمی توانند به طور مناسب از سیستم خارج شوند و توانایی لجن برای گرانوله شدن را کم می کنند.

با وجود اینکه زمان ته نشینی، کسر کوچکی از چرخه زمانی را به خود اختصاص می دهد اما تأثیر زیادی بر روی تشکیل گرانول دارد. برای بررسی تأثیر این پدیده، لی و همکاران چهار راکتور به ترتیب با زمان های ته نشینی ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵ دقیقه و با یکسان در نظر گرفتن سایر شرایط، راه اندازی کردند (شکل ۳) [۲۸].



شکل ۳- تأثیر زمان ته نشینی بر درصد گرانول [۲۸]

همانطور که در شکل ۲ دیده می شود، در زمان ته نشینی ۵ دقیقه، گرانول های هوازی حاکم هستند در حالی که در زمان های ته نشینی دیگر، ترکیبی از گرانول های هوازی و لجن معلق شکل گرفته اند. بنابراین با کاهش زمان ته نشینی، درصد گرانوله شدن لجن بیشتر می شود. در واقع زمان ته نشینی کم، باعث شسته شدن<sup>۲</sup> زیست توده های معلق که قابلیت ته نشینی پایینی دارند، شده و تنها گرانول هایی با قابلیت ته نشینی بالاتر، در سیستم باقی می مانند. نتایج دیگر تحقیق آنها نشان داد که آبریزی رابطه معکوس با زمان ته نشینی دارد. به نظر می رسد جمعیت میکروبی برای جلوگیری از شسته شدن سریع در زمان های ته نشینی پایین از راکتور، سعی در تغییر خاصیت سطحی خود برای افزایش خود تجمعی دارند.

### ۲-۵- رژیم غذایی گرسنگی - سیری

وانگ و همکاران با بهره برداری از یک راکتور SBR، رژیم های قحطی مختلفی را روی کربن، نیتروژن، فسفر و پتاسیم اعمال نمودند [۲۹]. مهم ترین نتیجه تحقیق آنها تأثیر این رژیم ها بر آبریزی سلول ها بوده است که نتایج در شکل ۴ آمده است. با توجه به شکل ۴ مشاهده می شود که اعمال رژیم قحطی برای نیتروژن، فسفر و پتاسیم، آبریزی سطحی سلول را کاهش می دهد

<sup>2</sup> Washout

<sup>1</sup> Hydraulic Washout

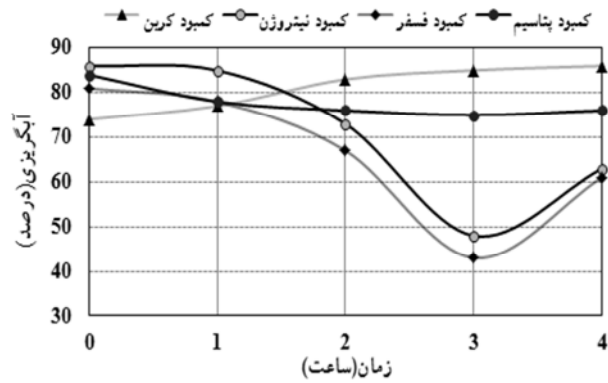
## ۲-۶-۲- راکتور پیوسته

در اکثر مطالعات صورت گرفته برای تشکیل لجن گرانوله هوازی، از راکتور SBR استفاده شده است. از آنجایی که راکتورهای جریان پیوسته نسبت به راکتورهای SBR رایج تر می باشند، یافتن روش شکل دهی گرانول ها در جریان پیوسته برای توسعه این فناوری امری ضروری است.

کیشیدا و همکاران نشان دادند که گرانوله شدن هوازی در راکتور جریان پیوسته<sup>۱</sup> نیز امکان پذیر است [۳۱]. راکتور مذکور با حجم کاری ۱۳/۸ لیتر و فاضلاب غنی شده از آمونیاک مورد بهره برداری قرار گرفت. در پژوهش مذکور، فاکتورهای تأثیرگذار بر گرانوله شدن هوازی نظیر بارگذاری سطحی<sup>۲</sup> و سرعت هوادهی، در راکتور مورد نظر بررسی شده است. برای بررسی بارگذاری سطحی، این کمیت از ۰/۶ تا ۳ متر مکعب بر متر مربع بر روز و برای بررسی سرعت هوادهی، مقدار آن بین ۰/۳ تا ۰/۸ لیتر بر دقیقه تنظیم شد. نتایج نشان داد که افزایش بارگذاری سطحی و سرعت هوادهی، تأثیر به سزایی بر تشکیل گرانول های هوازی، با خاصیت ته نشینی بالا و شسته شدن لجن پراکنده از سیستم دارد. آنها همچنین به منظور مقایسه دو نوع راکتور با جریان خوراک دهی، مداوم و دوره ای (SBR) از دو نوع راکتور بهره برداری کردند. تحت هر دو حالت خوراک دهی مشخصات گرانول های هوازی و ته نشینی آنها تفاوتی با یکدیگر نداشت و این موضوع با نتایج حاصل شده در تحقیقات قبلی، متناقض بود که دلیل آن، متفاوت بودن فاضلاب ورودی بود. موقعی که خوراک فاضلاب آلی است، جریان دوره ای در SBR باعث ایجاد شرایط گرسنگی - سیری در راکتور و جلوگیری از رشد باکتری های رشته ای که به طور مخربی ته نشینی لجن را تحت تأثیر قرار می دهند، می شود. حال اگر خوراک ورودی فاضلاب کاملاً غیر آلی باشد (در این مطالعه)، صرف نظر از شرایط خوراک دهی، باکتری های رشته ای ناتوان در ادامه حیات در این شرایط می باشند. بنابراین تأثیر الگوی خوراک دهی بر گرانوله شدن هوازی در این مطالعه دیده نشد.

## ۲-۶-۳- محل تخلیه در راکتورهای SBR

وانگ و همکاران با تحقیق بر روی محل قرار گرفتن شیر تخلیه نشان دادند که هر چه محل تخلیه به پایین راکتور نزدیک تر باشد، گرانول های هوازی سریع تر تشکیل می شوند [۳۲]. آنها با بهره برداری از چهار راکتور با نسبت های حجمی (به نسبت حجم بالای محل تخلیه به کل حجم راکتور گفته می شود به عبارت دیگر حجم مایع برداشته شده در پایان زمان ته نشینی مقرر نسبت به حجم



شکل ۴ - نمودار تاثیر فحطی های مواد مختلف در برابر زمان [۲۹]

در حالی که اعمال رژیم فحطی برای کربن باعث افزایش آبگریزی می شود. تحت شرایط فحطی نیترژن و فسفر، پلی ساکاریدهای خارج سلولی به طور جزئی کاهش پیدا می کنند در حالی که در شرایط فحطی کربن و پتاسیم، کاهش ۶۰ درصدی دیده می شود. این نتایج نشان می دهد که تحت شرایط گرسنگی کربن و پتاسیم، گرانول های هوازی ترجیح می دهند از طریق متابولیسم پلیمرهای خارج سلولی، انرژی خود را برای فعالیت های سلولی تأمین کنند. از طرف دیگر از آنجایی که کربن و پتاسیم جز عناصر اصلی در متابولیسم سلولی هستند، تحت شرایط فحطی کربن و پتاسیم، رشد گرانول های هوازی به طور چشمگیری کاهش می یابد.

## ۲-۶-۴- ساختار و نوع راکتور

یک از مواردی که در تشکیل گرانول های هوازی مؤثر است، شکل و ساختار هندسی راکتور است زیرا خصوصیات هندسی می توانند بر روی هیدرولیک و میزان اکسیژن رسانی به صورت مستقیم اثرگذار باشند.

## ۲-۶-۱- راکتور ناپیوسته

با توجه به موارد ذکر شده، عواملی نظیر تنش هیدرولیکی، رژیم غذایی گرسنگی - سیری و زمان ته نشینی در تشکیل گرانول های هوازی نقش اساسی دارند؛ لذا باید راکتورهایی انتخاب شوند که بتوانند این عوامل را تأمین کنند [۳۰].

راکتورهای ناپیوسته در مقابل راکتورهای پیوسته رایج نظیر لجن فعال، قابلیت بیشتری برای تأمین این عوامل دارند. تقریباً تمام گرانول های هوازی تاکنون در راکتور SBR شکل گرفته است. پس می توان نتیجه گرفت ساختار راکتور تأثیر زیادی بر الگوی جریان مایع و تجمع میکربی در راکتور دارد [۴].

<sup>1</sup> Aerobic Upflow Fluidized Bed (AUFB)

<sup>2</sup> Surface Loading Rate

کار راکتور) ۲۰ تا ۸۰ درصد به نتایج ذکر شده در جدول زیر رسیدند که مربوط به روز سی ام بود.

جدول ۲- خواص فیزیکی گرانول‌ها با محل‌های خروج متفاوت [۳۲]

خاصیت	نسبت حجمی			
	۲۰ درصد	۴۰ درصد	۶۰ درصد	۸۰ درصد
مدت زمان لازم برای ظاهر شدن گرانول (روز)	۲۰±۱	۱۲±۱	۶±۱	۲±۱
درصد خاش برداشته شده	۹۲±۱	۹۶±۲	۹۸±۱	۹۹±۱
زمان ماند جامد (روز)	۸/۷±۰/۳	۷/۷±۰/۱	۳/۶±۰/۲	۵/۳±۰/۲

همان‌طور که از جدول ۲ پیداست با افزایش نسبت حجمی، درصد خاش برداشته شده افزایش، زمان ماند جامد بیشتر و زمان لازم برای تشکیل گرانول‌ها کاهش می‌یابد. بعد از دو روز از شروع کار، گرانول‌های هوازی در راکتور اول با نسبت حجمی ۸۰ درصد ظاهر شدند در حالیکه در راکتورهای دوم تا چهارم با نسبت‌های حجمی به ترتیب ۲۰، ۴۰، ۶۰ درصد بعد از ۶، ۱۲ و ۲۰ روز، گرانول‌ها مشاهده شدند. بنابراین نسبت‌های حجمی بالاتر برای تشکیل گرانول‌ها مؤثر است. علاوه بر این، شاخص حجمی لجن در نسبت حجمی ۲۰ درصد، ۳ برابر مقدار متناظر در نسبت ۸۰ درصد است.

حداقل سرعت ته‌نشینی که جمعیت میکروبی باید داشته باشد تا پس از زمان تعیین شده برای ته‌نشینی، از محل خروجی از سیستم شسته نشوند، به‌طور مستقیم با نسبت حجمی رابطه دارد. حداقل سرعت ته‌نشینی باید بالاتر از سرعت ته‌نشینی لجن معلق باشد تا در زمان تعیین شده، لجن با ساختار سست از سیستم خارج شده و فقط گرانول‌هایی که توانایی بالا در ته‌نشینی دارند در سیستم باقی بمانند.

دیده شد که یون کلسیم به‌طور قابل ملاحظه‌ای در گرانول‌های هوازی در نسبت‌های حجمی بالاتر تجمع پیدا می‌کند. همچنین با افزایش نسبت حجمی، تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی نیز افزایش می‌یابد. کلسیم با پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی ترکیب شده و تشکیل پل کلسیم-پلی‌ساکارید که در تشکیل ساختار سه بعدی و پایدار گرانول‌های هوازی مؤثر است، می‌دهد.

## ۲-۶-۴- نسبت ارتفاع به قطر راکتور

پن در پژوهشی نشان داد که در راکتور SBR با افزایش نسبت ارتفاع به قطر، تشکیل گرانول‌های هوازی بیشتر می‌شود [۴]. افزایش نسبت ارتفاع به قطر راکتور سبب افزایش اختلاط و انحلال اکسیژن و بهبود در انتقال آن می‌شود. در راکتور ستونی SBR، جریان هوا دارای الگوی بالا رونده است. الگوی بالا رونده هوا یا مایع در راکتور ستونی، جریان مدور نسبتاً یکنواختی را در کل ارتفاع ستون ایجاد می‌کند. بنابراین جمعیت میکروبی به‌طور مداوم در معرض سایش هیدرولیکی چرخشی هستند. جریان مدور موجب می‌شود که جمعیت میکروبی به‌صورت گرانول‌های منظم با پایین‌ترین سطح انرژی آزاد شکل بگیرند. در راکتور ستونی SBR، بالاتر بودن نسبت ارتفاع به قطر راکتور باعث اطمینان در ایجاد مسیر چرخشی و به‌دنبال آن، ایجاد سایش هیدرولیکی مؤثرتر برای تجمع میکروبی می‌شود.

## ۲-۷-۲- زمان ماند توده سلولی

لی<sup>۱</sup> در رساله دکترای خود به بررسی زمان‌های مختلف ماند توده سلولی شامل ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۴۰ روز پرداخت. نتایج تحقیق نشان داد که این کمیت تأثیر کمی در کارکرد راکتور دارد [۴].

## ۲-۸-۲- تأثیر مقدار اکسیژن محلول

پنگ و همکاران از یک راکتور SBR به‌مدت سه ماه با غلظت اکسیژن محلول ۰/۷ تا ۱ میلی‌گرم در لیتر بهره‌برداری کردند. بعد از یک ماه بهره‌برداری، لجن گرانوله تشکیل شد و راندمان حذف خاش ۹۵ درصد شد. اگر چه مقدار اکسیژن محلول در راکتور کمتر از ۱ میلی‌گرم در لیتر نگه داشته شد، اما هیچ باکتری رشته‌ای مشاهده نشد و شاخص حجمی لجن بین ۸۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر حاصل شد [۳۳]. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش دبی هوادهی، نرخ تجزیه مواد آلی بیشتر می‌شود، این در حالی است که غلظت اکسیژن محلول در راکتور تقریباً یکسان (کمتر از ۱ درصد اشباع) است. موقعی که منبع هوا متوقف می‌شود، فعالیت تجزیه‌ای نیز در همان زمان متوقف می‌شود. این نشان می‌دهد که فعالیت گرانول‌ها شدیداً وابسته به منبع تغذیه اکسیژن است و وابسته به غلظت اکسیژن نیست.

## ۲-۹-۲- تأثیر یون فلزات دو ظرفیتی

فلزات دو ظرفیتی مثل آهن و کلسیم به‌خاطر نقش مهم‌شان در خودتجمعی زیست توده میکروبی می‌توانند موجب بهبود گرانوله

<sup>۱</sup> Y.Li

شدن شوند. پلیمرهای برون سلولی به خاطر تشکیل کمپلکس‌های پایدارتر، ترجیح می‌دهند با فلزات چند ظرفیتی پیوند دهند. گروه عاملی ثانویه در پلی‌ساکاریدها مثل هیدروکسید، می‌تواند با این فلزات واکنش داده و تشکیل ماتریس پلیمری مستحکم ژل مانند دهد [۳۴].

مینگ لی و همکاران از دو راکتور، یکی بدون اضافه کردن سولفات منیزیم و دیگری با ورودی ۱۰ میلی‌گرم در لیتر یون منیزیم، به مدت ۵۲ روز بهره‌برداری کردند [۳۴]. دیده شد که فرایند گرانوله شدن در راکتور اول مشابه راکتور دوم ولی با روندی کندتر صورت می‌گیرد. اضافه کردن منیزیم سبب ایجاد تفاوت در مورفولوژی میکربی نمی‌شود، بلکه با تسریع در فرایند گرانوله شدن، موجب تشکیل گرانول‌هایی بزرگ‌تر می‌شود. آنها همچنین پیشنهاد کردند که کلسیم و منیزیم از دو راه باعث بهبود فرایند گرانوله شدن می‌شود. اولاً هر دو یون می‌توانند با گروه‌های باردار منفی موجود در سطح باکتری و پلی‌ساکاریدهای برون سلولی پیوند داده و به‌عنوان پلی در اتصال اجزا عمل کرده و تجمع میکربی را بهبود بخشند. ثانیاً، گرانول‌های الحاق شده به هر دو یون، مقادیر بیشتری پلی‌ساکارید بدون افزایش در محتوای پروتئینی تولید می‌کنند.

## ۲-۱۰- تأثیر پلیمرهای برون سلولی

پلیمرهای برون سلولی محصولات متابولیکی هستند که در سطح سلول باکتری تجمع پیدا کرده و شامل ترکیبات آلی متنوعی از جمله پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی، پروتئین خارج سلولی، اسید هیومیک و غیره هستند. آنها لایه‌ای بافری را برای سل در برابر شرایط نامطلوب خارجی ایجاد می‌کنند [۳۵].

وانگ و همکاران راکتوری را به مدت ۲۰ روز بهره‌برداری کردند [۳۶]. آنها پلیمر خارج سلولی را در زمان آزمایش مورد بررسی قرار دادند. پلیمر خارج سلولی می‌تواند روی خاصیت سطحی سلول مثل آگریزی تأثیرگذار بوده و باعث بهبود فرایند گرانوله شدن هوازی شود. پلیمرهای خارج سلولی عمدتاً در فاز لگاریتمی رشد، تولید شده و به‌عنوان منبع کربن و انرژی در شرایط گرسنگی در فرایند گرانوله شدن عمل می‌کنند و باعث رشد و یکپارچگی گرانول‌ها می‌شوند در حالی که چنین پدیده‌ای در فرایند لجن فعال اتفاق نمی‌افتد.

## ۲-۱۱- تأثیر دما بر لجن گرانوله هوازی

اکثر تحقیقات در زمینه لجن گرانوله هوازی در شرایط دمایی ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس انجام شده است. کروک و همکاران یک راکتور SBAR را در شرایط دمایی ۸، ۱۵ و ۲۰ درجه سلسیوس مورد بهره‌برداری قرار دادند [۳۷]. آنها نشان دادند که دمای عملکرد ۸

درجه سلسیوس باعث رشد باکتری‌های رشته‌ای و تشکیل گرانول‌هایی با شکلی نامنظم می‌شود و در این شرایط، شسته شدن شدید زیست توده و شرایط ناپایا ایجاد می‌شود. اما اگر در حین کار راکتور، دما پایین بیاید، لجن گرانوله در مقابل شوک دمایی مقاوم است و حالت پایدار خود را حفظ می‌کند ولی در عین حال، راندمان تصفیه کاهش می‌یابد.

## ۲-۱۲- تأثیر pH بر لجن گرانوله هوازی

یانگ و همکاران دو راکتور SBR را تحت شرایط عملیاتی یکسان به منظور بررسی تأثیر قلیایت خوراک و pH در تشکیل لجن گرانول هوازی، راه‌اندازی کردند [۳۸]. راکتور اول در شرایط قلیایت پایین بین ۷ تا ۲۸ میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم (pH حدود ۳) نگهداری شد و در راکتور دوم با اضافه کردن ۴۴۰ میلی‌گرم در لیتر بی‌کربنات سدیم به خوراک باعث افزایش قلیایت آن به ۳۰۱ میلی‌گرم کربنات کلسیم و در نتیجه افزایش pH در محدوده ۸ شد. در راکتور اول و دوم، گرانول‌ها به ترتیب پس از ۷ و ۲۰ روز تشکیل شدند و پس از ۳۰ و ۴۵ روز به حالت پایدار رسیدند.

در راکتور اول، گونه میکربی قارچ (محیط اسیدی در این راکتور شرایط را برای رشد قارچ‌ها فراهم و مانع رشد باکتری‌ها می‌شود) و گرانول‌ها کرکی و دارای ساختاری سست ایجاد شد. در راکتور دوم گرانول‌ها دارای ساختاری متراکم و عمدتاً باکتری بودند. همانطور که گفته شد گرانوله شدن در راکتور اول بسیار سریع‌تر نسبت به راکتور دوم کامل شد. این به این دلیل است که سلول‌های قارچی بسیار بلندتر از باکتری‌ها بوده و می‌توانند سریع در هم گیر کرده و در راکتور باقی بمانند در حالی که باکتری‌ها چنین خاصیتی را نداشته و در زمان راه‌اندازی به راحتی از سیستم شسته می‌شوند. با این وجود به خاطر ساختار متراکم گرانول‌های ساخته شده از باکتری‌ها در مقایسه با گرانول‌های سست قارچی بعد از گرانوله شدن لجن، محتوای زیست توده در راکتور دوم در مقایسه با راکتور اول بیشتر است.

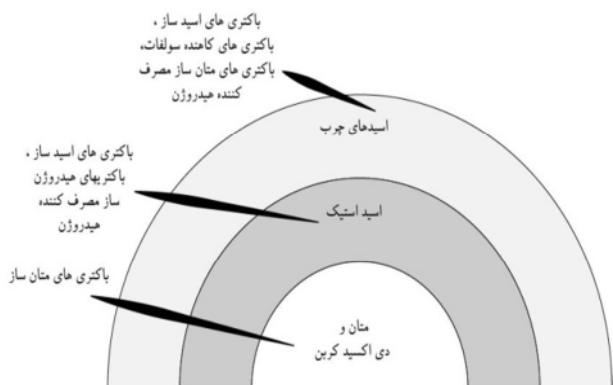
## ۳- مقایسه گرانول هوازی و غیر هوازی

عوامل مؤثر بر تشکیل گرانول‌های غیر هوازی را می‌توان به دو قسمت عملیاتی و محیطی تقسیم‌بندی نمود. عوامل عملیاتی شامل بار لجن، بار آلی، روند افزایش نرخ بار، شرایط هیدرودینامیکی و مقدار هسته‌های رشد است در حالی که عوامل محیطی مثل دما، محدوده pH، غلظت یون‌هایی نظیر کلسیم و آلومینیوم هستند [۳۹].

نرخ بارگذاری بهینه برای گرانول‌های غیر هوازی بین ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر است در حالی که برای گرانول‌های هوازی،



مقدار بهینه طبق پژوهش کارلیو که چهار راکتور را با غلظت‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر بهره‌برداری کرد، برابر ۳۰۰۰ به دست آمده است [۴۰]. این نشان می‌دهد که هر دو برای تشکیل بهتر گرانول نیاز به بار آلی نسبتاً زیاد دارند. کاتیون‌های دو ظرفیتی مثل کلسیم، منیزیم و آهن برای گرانول‌های بی‌هوازی همانند گرانول‌های هوازی سبب بهبود کیفیت لجن و گرانول‌ها می‌شود [۱۰]. همچنین پلیمر خارج سلولی در هنگام تشکیل هر دو نوع گرانول افزایش چشمگیر دارد [۴۱]. از نظر ساختاری بر طبق پیشنهاد لیو، گرانول‌های غیرهوازی دارای سه لایه با ترکیبی از گونه‌های مختلف متان‌سازها، اسیدسازها و گونه‌های هیدرولیز کننده هستند (شکل ۵). تی نیز در پژوهشی، ساختاری سه لایه برای گرانول هوازی با گونه‌های مختلف هوازی، دوگانه‌زی و غیر هوازی در نظر گرفته است [۴۲ و ۴۳].



شکل ۵- ساختار هوازی (سمت راست) و غیر هوازی (سمت چپ) [۴۲ و ۴۳]

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به آنچه ذکر شد، می‌توان عوامل مؤثر بر تشکیل گرانول‌های هوازی در راکتور SBR هوازی را به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول عواملی اساسی هستند که در تشکیل گرانول‌های هوازی نقش بنیادی را ایفا می‌کنند که شامل تنش برشی، زمان ته‌نشینی و محل تخلیه فاضلاب تصفیه شده است. چنانچه این سه عامل در محدوده

بهینه قرار نگیرند، تشکیل گرانول‌ها و عملکرد سیستم را شدیداً تحت تأثیر خود قرار داده و موجب از هم پاشیدگی سیستم می‌شوند. در حالی که عوامل فرعی دیگر نظیر یون فلزات دو ظرفیتی، غلظت اکسیژن محلول، نسبت ارتفاع به قطر راکتور، دما و غیره اگرچه تأثیرگذار بر فرایند گرانولاسیون می‌باشند، ولی چنانچه عوامل اساسی در محدوده بهینه خود قرار داشته باشند، انحراف این عوامل فرعی از حالت بهینه نمی‌تواند سیستم گرانولاسیون را دچار اختلال کند.

#### ۵- پیشنهادها

اگرچه تاکنون پیشرفت‌هایی در زمینه لجن گرانوله هوازی صورت گرفته است، اما هنوز مطالعات بیشتری برای فهم کامل گرانوله شدن و توسعه آن به صورت یک فناوری مقرون به صرفه، مورد نیاز است. مواردی که می‌تواند در مطالعات آینده به عنوان موضوعات پژوهشی مد نظر قرار گیرد در زیر آمده است.

فاکتورهای تأثیرگذار بر گرانوله شدن به طور عمده در مقیاس آزمایشگاهی و برای فاضلاب سنتز شده حاوی گلوکز و استات، بررسی شده است. اطلاعات در مورد عملکرد لجن گرانوله هوازی در تصفیه فاضلاب طبیعی و همچنین کاربرد این فناوری در مقیاس صنعتی، محدود است. برای بهره‌برداری از فناوری لجن گرانوله در مقیاس صنعتی با دوره راه‌اندازی معقول، مطالعات بیشتر بر روی فاضلاب شهری و صنعتی و همچنین یافتن راهکاری برای حفظ پایداری گرانول‌ها در طولانی مدت، نیاز است.

تاکنون مطالعاتی که بر روی سیستم گرانول‌های هوازی صورت گرفته است، فاکتورهای تأثیرگذار بر گرانول‌سازی میکروبی را به صورت جداگانه و با ثابت در نظر گرفتن سایر عوامل (به جز فاکتور مورد مطالعه) بررسی کرده‌اند. بهینه‌سازی شرایط برای گرانول‌سازی میکروبی با اعمال تمامی فاکتورهای مؤثر، مورد نیاز است زیرا این احتمال وجود دارد که فاکتورهای مختلف بر عملکرد یکدیگر تأثیرگذار باشند. روش‌های طراحی آزمایش نظیر تاکوچی می‌تواند برای رسیدن به این هدف مورد استفاده قرار گیرد.

از آنجایی که راندمان حذف در راکتور گرانوله SBR بالا است، می‌توان از پساب خروجی برای مصارف صنعتی و یا آبیاری استفاده نمود. اما باید به این نکته نیز توجه شود که احتمال حضور میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا در گرانول‌ها در مقایسه با لجن فعال معمولی بالاتر است. این در حالی است که تاکنون تحقیقی بر روی میکروب‌های بیماری‌زای گرانول‌های هوازی، روش‌های حذف و کلرزی مؤثر آنها صورت نگرفته است.

1. Qin, L., and Liu, Y. (2006). "Aerobic granulation for organic carbon and nitrogen removal in alternating aerobic-anaerobic sequencing batch reactor." *Chemosphere*, 63(6), 926-933.
2. Jiang, H. L., Tay, J. H., and Tay, S. T. (2002). "Aggregation of immobilized activated sludge cells into aerobically grown microbial granules for the aerobic biodegradation of phenol." *Letters in Applied Microbiology*, 35(5), 439-445.
3. Liu, L., Wang, Z., Yao, J., Sun, X., and Cai, W. (2005). "Investigation on the properties and kinetics of glucose-fed aerobic granular sludge." *Enzyme and Microbial Technology*, 36(2-3), 307-313.
4. Liu, Y. (2006). *Wastewater purification : Aerobic granulation in sequencing batch reactors*, CRC Press, Boca Raton.
5. Mehdizadeh, H. J. S. (2003). "The effect of sulfate concentration on COD removal and sludge granulation in UASB reactors." *International Journal of Engineering*, 16, 1-10.
6. Shayegan, J., Ghavipankeh, F., and Mirjafari, P. (2005). "The effect of influent COD and upward flow velocity on the behavior of sulphate-reducing bacteria." *Process Biochemistry*, 40, 2305-2310.
7. Gao, D., Liu, L., Liang, H., and Wu, W. M. (2011). "Aerobic granular sludge: characterization, mechanism of granulation and application to wastewater treatment." *Crit. Rev. Biotechnol*, 31(2), 137-152.
8. Shayegan, J., Yousefnejad, M. S., and Hemati, A. (2010). "A survey of sludge granulation theories under anaerobic conditions." *J. of Water and Wastewater*, 76, 44-53. (In Persian)
9. Beun, J. J., Hendriks, A., van Loosdrecht, M. C. M., Morgenroth, E., Wilderer, P. A., and Heijnen, J. J. (1999). "Aerobic granulation in a sequencing batch reactor." *Water Research*, 33(10), 2283-2290.
10. Wang, S.-G., Liu, X.-W., Zhang, H.-Y., Gong, W.-X., Sun, X.-F., and Gao, B.-Y. (2007). "Aerobic granulation for 2,4-dichlorophenol biodegradation in a sequencing batch reactor." *Chemosphere*, 69(5), 769-775.
11. Zheng, Y. M., Yu, H. Q., Liu, S. J., and Liu, X. Z. (2006). "Formation and instability of aerobic granules under high organic loading conditions." *Chemosphere*, 63(10), 1791-1800.
12. Muda, K., Aris, A., Salim, M. R., Ibrahim, Z., Yahya, A., van Loosdrecht, M. C. M., Ahmad, A., and Nawahwi, M. Z. (2010). "Development of granular sludge for textile wastewater treatment." *Water Research*, 44(15), 4341-4350.
13. Wagner, J., and da Costa, R. (2013). "Aerobic granulation in a sequencing batch reactor using real domestic wastewater." *J. of Environmental Engineering*, 139(11), 1391-1396.
14. Tay, J. H., Liu, Q. S., and Liu, Y. (2001). "Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor." *J. of Applied Microbiology*, 91(1), 168-175.
15. Wang, S.-G., Liu, X.-W., Gong, W.-X., Gao, B.-Y., Zhang, D.-H., and Yu, H.-Q. (2007). "Aerobic granulation with brewery wastewater in a sequencing batch reactor." *Bioresource Technology*, 98(11), 2142-2147.
16. Ma, D.-Y., Wang, X.-H., Song, C., Wang, S.-G., Fan, M.-H., and Li, X.-M. (2011). "Aerobic granulation for methylene blue biodegradation in a sequencing batch reactor." *Desalination*, 276(1-3), 233-238.
17. Morales, N., Figueroa, M., Fra-Vázquez, A., Val del Río, A., Campos, J. L., Mosquera-Corral, A., and Méndez, R. (2013). "Operation of an aerobic granular pilot scale SBR plant to treat swine slurry." *Process Biochemistry*, 48(8), 1216-1221.
18. Rosman, N. H., Nor Anuar, A., Othman, I., Harun, H., Sulong, M. Z., Elias, S. H., Mat Hassan, M. A. H., Chelliapan, S., and Ujang, Z. (2013). "Cultivation of aerobic granular sludge for rubber wastewater treatment." *Bioresource Technology*, 129(0), 620-623.
19. Hailei, W., Guangli, Y., Guosheng, L., and Feng, P. (2006). "A new way to cultivate aerobic granules in the process of papermaking wastewater treatment." *Biochemical Engineering Journal*, 28(1), 99-103.
20. Amorim, C. L., Maia, A. S., Mesquita, R. B. R., Rangel, A. O. S. S., van Loosdrecht, M. C. M., Tiritan, M. E., and Castro, P. M. L. (2011). "Performance of aerobic granular sludge in a sequencing batch bioreactor exposed to ofloxacin, norfloxacin and ciprofloxacin." *Water Research*, 45, 101-113.
21. Duque, A. F., Bessa, V. S., Carvalho, M. F., de Kreuk, M. K., van Loosdrecht, M. C. M., and Castro, P. M. L. (2011). "2-Fluorophenol degradation by aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor." *Water Research*, 45(20), 6745-6752.

22. Li, A.-J., Li, X.-Y., and Yu, H.-Q. (2011). "Effect of the food-to-microorganism (F/M) ratio on the formation and size of aerobic sludge granules." *Process Biochemistry*, 46, 11.
23. Tay, J., Pan, S., He, Y., and Tay, S. (2004). "Effect of organic loading rate on aerobic granulation. II: characteristics of aerobic granules." *J. of Environmental Engineering*, 130(10), 1102-1109.
24. Yang, S., Tay, J., and Liu, Y. (2005). "Effect of substrate nitrogen/chemical oxygen demand ratio on the formation of aerobic granules." *J. of Environmental Engineering*, 131(1), 86-92.
25. Lin, Y. M., Liu, Y., and Tay, J. H. (2003). "Development and characteristics of phosphorus-accumulating microbial granules in sequencing batch reactors." *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 62(4), 430-435.
26. Tay, J. H., Liu, Q. S., and Liu, Y. (2001). "The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules." *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 57(1-2), 227-233.
27. Pan, S., Tay, J. H., He, Y. X., and Tay, S. T. (2004). "The effect of hydraulic retention time on the stability of aerobically grown microbial granules." *Letters in Applied Microbiology*, 38(2), 158-163.
28. Qin, L., Liu, Y., and Tay, J.-H. (2004). "Effect of settling time on aerobic granulation in sequencing batch reactor." *Biochemical Engineering Journal*, 21(1), 47-52.
29. Wang, Z.-W., Li, Y., Zhou, J.-Q., and Liu, Y. (2006). "The influence of short-term starvation on aerobic granules." *Process Biochemistry*, 41(12), 2373-2378.
30. Jiaheng, Z., Su, W., Jun, L., Mei, H., Hille, A., and Horn, H. (2011). "Aerobic granulation in a modified continuous flow system." *Proc. Bioinformatics and Biomedical Engineering, (iCBBE) 5<sup>th</sup> International Conference*, IEEE, Wuhan, 1-5.
31. Kishida, Y., Yamashita, A. K., and Tsuneda, S. (2010). "Formation of aerobic granular Sludge in a continuous-flow reactor – control strategy for the selection of well-settling granular sludge." *J. of Water and Environment Technology*, 8, 251-258.
32. Wang, Z. W., Liu, Y., and Tay, J. H. (2006). "The role of SBR mixed liquor volume exchange ratio in aerobic granulation." *Chemosphere*, 62(5), 767-771.
33. Dangcong, P., Bernet, N., Delgenes, J. P., and Moletta, R. (1999). "Aerobic granular sludge-a case report." *Water Research*, 33(3), 890-893.
34. Li, X.-M., Liu, Q.-Q., Yang, Q., Guo, L., Zeng, G.-M., Hu, J.-M., and Zheng, W. (2009). "Enhanced aerobic sludge granulation in sequencing batch reactor by Mg<sup>2+</sup> augmentation." *Bioresource Technology*, 100(1), 64-67.
35. Costerton, J. W. (1999). "The role of bacterial exopolysaccharides in nature and disease, (Volume 26)." *J. Ind Microbiol. Biotech.*, 22(4-5), 551-563.
36. Wang, Z., Liu, L., Yao, J., and Cai, W. (2006). "Effects of extracellular polymeric substances on aerobic granulation in sequencing batch reactors." *Chemosphere*, 63(10), 1728-1735.
37. de Kreuk, M. K., Pronk, M., and van Loosdrecht, M. C. (2005). "Formation of aerobic granules and conversion processes in an aerobic granular sludge reactor at moderate and low temperatures." *Water Res*, 39(18), 4476-4484.
38. Yang, S. F., Li, X. Y., and Yu, H. Q. (2008). "Formation and characterisation of fungal and bacterial granules under different feeding alkalinity and pH conditions." *Process Biochemistry*, 43(1), 8-14.
39. Shayegan, J., Hemmati, A., and Yousefnejad, M. S. (2010). "Factors involved in sludge granulation under anaerobic conditions." *J. of Water and Wastewater*, 77, 68-75. (In Persian)
40. Liu, Q. S., Tay, J. H., and Liu, Y. (2003). "Substrate concentration-independent aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor." *Environmental Technology*, 24(10), 1235-1242.
41. Wang, D., Zheng, G., Wang, S., Zhang, D., and Zhou, L. (2011). "Biodegradation of aniline by *Candida tropicalis* AN1 isolated from aerobic granular sludge." *J. of Environmental Sciences*, 23(12), 2063-2068.
42. Liu, Y., Xu, H.-L., Yang, S.-F., and Tay, J.-H. (2003). "Mechanisms and models for anaerobic granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactor." *Water Research*, 37(3), 661-673.
43. Tay, J. H., Ivanov, V., Pan, S., and Tay, S. T. (2002). "Specific layers in aerobically grown microbial granules." *Letters in Applied Microbiology*, 34(4), 254-257.