مکانیسم و عوامل مؤثر بر فلکولاسیون بیولوژیکی

رامین نبی‌زاده*

چکیده

شناخت و درک صحیح فرآیند فلکولاسیون به لحاظ کاربری اصول حاکم بر آن در طراحی و بهره‌برداری صحیح واحدهای فرآیند بیولوژیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فلکولاسیون خودبخودی فرآیندی است که به‌کندی صورت پذیرفته وکارآیی مناسب حوضچه ته‌نشینی ثانویه را تضمین می‌کند. در این مقاله به اختصار مکانیسم عمل و عوامل مؤثر بر آن نظیر سرعت رشد، غلظت سوبستره، نقش گونه‌های خاص میکروبی، نقش پلیمرهای خارج سلولی، رقابت میکروارگانیسمها و تأثیر باکتریها و قارچها بحث خواهد شد.

یک لخته بیولوژیکی عبارت است از توده قابل رویت ماکروسکوپی، که شامل میلیونها باکتری توام با پروتوزئرها و قارچها و بسیاری از زیست گونه‌های دیگر می‌باشد. شکل ۱ تصویر معمولی از یک لخته بیولوژیکی را نشان می‌دهد. فلکولاسیون خودبخودی فرآیندی است که همراه رشد کند بیولوژیک در داخل یک رآکتور بیولوژیکی صورت می‌پذیرد و امکان کارکرد مناسب را در واحد ته‌نشینی فراهم می‌آورد. به عبارتی فلکولاسیون خودبخودی پلی بین رشد میکروبی در راکتور بیولوژیکی و ته‌نشینی در واحد ته‌نشینی ثانویه ایجاد می‌نماید. چنانچه سلول میکروبی را به عنوان کوچکترین راکتور بیولوژیکی در نظر بگیریم، آنگاه می‌توان هر یک از فلاکها را به عنوان کوچکترین سیستم اکولوژیکی در رآکتور بیولوژیکی تلقی کرد. شناخت و درک صحیح فرآیند فلکولاسیون به لحاظ کاربرد اصول حاکم بر آن در طراحی و بهره‌برداری واحدهای فرآیند مزبور، از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. لذا در زیر علاوه بر توضیح عوامل مؤثر بر فلکولاسیون بیولوژیکی در خصوص مکانیسمهای محتمل موجد آن بحث می‌گردد.

عواملی که بر فرآیند فلکولاسیون مؤثر هستند بعضاً عبارتند از :

* سرعت رشد
* غلظت سوبستره
* نقش گونه‌های خاص میکروبی (مثل زواگلیا رامیگرا)
* نقش محصولات ذخیره‌ای میکروبی (PHB)[1]

* - دانشجوی دکتری بهداشت محیط دانشکده بهداشت
دانشگاه علوم پزشکی تهران

1- Poly - hydroxy - butyrate

شکل ۱ : تصویر معمول یک فلاک

* نقش پلیمرهای خارج سلولی
* تأثیر رقابتی حضور جمعیت میکروبی مختلط و متنوع
* تأثیر باکتریهای رشته‌ای و قارچها

* سرعت رشد

از شرایط لازم جهت رخداد فلکولاسیون کاهش سرعت رشد می‌باشد. تغییرات رشد را در تبیین ریاضی فرآیند لجن فعال به صورت (dX / dt) ارائه می‌نماییم که‌تابعی از غلظت توده زیستی (Biomass) می‌باشد. به عبارت دیگر :

$$(dX/dt)=\mu X \qquad (1)$$

که در آن :

(dX/dt) = میزان رشد توده زیستی (جرم بر واحد حجم / زمان)

μ = میزان رشد ویژه (زمان /1)

X = غلظت توده زیستی (جرم بر واحد حجم)

از طرفی بر اساس معادله مونود :

$$\mu = \mu m\ [S/(Ks+S)] \qquad (2)$$

که در آن :

μ = میزان رشد ویژه (زمان /1)

μm = حداکثر میزان رشد ویژه (زمان /1)

S = غلظت سوبستره محدود کننده رشد (جرم بر واحد حجم)

Ks = ثابت اشباع (معادل غلظت سوبستره در $\mu = \mu m/2$) معروف به ثابت نصف سرعت (جرم بر واحد حجم)

از جایگزینی رابطه (۲) در رابطه (۱) خواهیم داشت :

$$(dX/dt)= \mu m \times S/ (Ks+S) \qquad (3)$$

رابطه (۳) نشان دهنده این است که سرعت رشد تابع غلظت سوبستره می‌باشد و از آنجایی که کاهش سرعت رشد بیولوژیکی لازمه فلکولاسیون خودبخودی است در نتیجه برای انجام فلکولاسیون باید غلظت سوبستره کاهش یابد.

میزان رشد ویژه (μ) را می‌توان پارامتر مؤثری جهت انجام فرآیند فلکولاسیون به شمار آورد. در سیستمهای پیوسته بدون برگشت لجن، معادله رشد را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$(dX/dt)= \mu X-DX \qquad (4)$$

در صورتی که F ، جریان ورودی به راکتور و V ، حجم

راکتور باشد، D ضریب ترقیق معادل F/V خواهد بود که دیمانسیون آن همانند میزان رشد ویژه، (زمان / 1) می‌باشد. زمانی که سرعت رشد صفر است، μ با D برابر است، حتی در مواقعی که سرعت رشد کند است مقادیر μ و D تفاوت زیادی ندارند. در سیستمهای با برگشت لجن و اختلاط کامل برای انجام فلکولاسیون خودبخودی باید $D<\mu$ گردد. در سیستمهای با بار آلی زیاد اگر θ در حدود ۰/۵ روز یا کمتر گردد، فلکولاسیون به مقدار زیاد رخ نمی‌دهد و غلظت مواد جامد معلق در پساب خروجی ازدیاد خواهد یافت. [۳]

با توجه به نقش سیستماتیک پارامتر μ (میزان رشد ویژه) می‌توان به لزوم برقراری مقادیر کوچک μ در راکتورهای بیولوژیکی تأکید کرد. در ضمن مشاهده گردیده که در مقادیر کمتر μ مقدار Se (غلظت سوبسترہ محلول خروجی) کاهش خواهد یافت و به علاوه لجن اضافی کمتری نیز در سیستم تولید می‌گردد. پارامتر میزان رشد ویژه گر چه در عمل قابلیتهایی را درکنترل فرآیند فلکولاسیون در اختیار می‌گذارد ولیکن پایه علمی جهت فهم مکانسیم فلکولاسیون بدست نمی‌دهد.

* غلظت سوبسترہ

تأثیر غلظت سوبسترہ بر فرآیند فلکولاسیون در ضمن توضیح تأثیر رشد بیولوژیکی در قسمت قبل ، مورد بحث قرار گرفت. برخی از اوقات اینطور بیان می‌شود که فلکولاسیون در فاز خود تخریبی صورت می‌پذیرد. به نظر می‌رسد که حالت خودتخریبی حتی زمانی که سوبسترہ به مقدار زیاد کاهش نیافته ولی رشد خالص متوقف شده است، نیز صورت می‌پذیرد، به عبارت دیگر پدیده فلکولاسیون منحصر به فاز خودتخریبی نیست. لذا بهتر است گفته شود که فلکولاسیون در مقادیر سرعت رشد اندک و غلظت سوبسترہ پایین اتفاق می‌افتد.

* نقش گونه‌های خاص میکروبی

گروه Pseudomonadaceae شامل ۴ گونه Zooglea, Xanthomonas, Pseudomonas و Gluconobacter می‌باشد. گونه Zooglea به عنوان اولین موجود مولد فلاک در لجن فعال تعیین شده است. آزمایشهای انجام شده بر روی فلاکها نشان می‌دهد که تشکیل فلاکها به نسبت C/N در محیط بستگی دارد. زواگلیا شدیداً هوازی بوده و اکسیژن را به عنوان پذیرنده نهایی الکترون مورد استفاده قرار می‌دهد. اگر ویتامینهای B_{12} و بیوتین فراهم باشد، قندهای متعدد، اسیدهای آمینه، با اسیدهای آلی می‌تواند به عنوان منبع منحصر کربن و انرژی مورد استفاده قرار گیرد. آزمایش فلاک توسط میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که پیوستگی سلولها به یکدیگر به دلیل فیبریلهای خارج سلولی است. در حالی که علت به هم چسبیدن فلاکها وجود لایه ژلاتینی لزج[1] تصور می‌شد. نقش زواگلیا رامیگرا در فلکولاسیون، از طریق ایجاد لایه ژلاتینی چسبنده و رشد لایه مزبور به موازات رشد بیولوژیکی در سیستم توجیه می‌شد. در این رابطه نیروی چسبندگی بین مولکولهای پلیمر از نیروی حاصل از برش هیدرولیکی ناشی از اختلاط بیشتر است. در داخل توده ژلاتینی حاصل از زواگلیا رامیگرا شرایط مناسب برای سایر صیادان و همچنین سطح مناسبی برای چسبیدن سایر ارگانیسمها پدید می‌آید. در سال ۱۹۵۲ مک‌کینی و هووارد[۲] نشان دادند که فلکولاسیون مختص زواگلیا رامیگرا نیست و سایر گونه‌های یافت شده در فاضلاب نیز قابلیت ایجاد فلاک را دارند. بطور کلی تشکیل فلاک در مواقعی که کربن و منابع انرژی اندک باشند، صورت می‌پذیرد و این فرآیند بیش از اینکه وابسته به حضور میکروارگانیسم خاصی باشد، به کنترل عوامل محیطی وابسته است.

* نقش محصولات ذخیره‌ای میکروبی (PHB)

وقتی کربن به مقدار زیاد در سیستم وجود دارد و سایر مواد مغذی کم هستند، برخی از باکتریها شروع به ایجاد مواد و محصولات ذخیره‌ای در داخل سلول می‌نمایند. این مواد ذخیره‌ای به صورت مولکولهای پلی‌هیدروکسی

1- Slime Layer

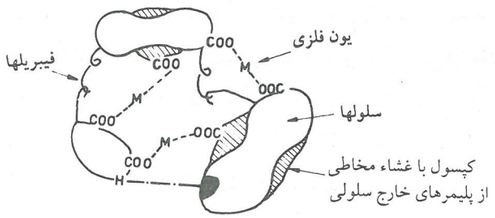
بوتیرات (PHB) هستند. کرابتری (۱۹۶۶) نتیجه گرفت که سنتز مواد ذخیره‌ای میکروبی مثل پلی بتاهیدروکسی بوتریک اسید علت فلکولاسیون میکروبی است، اما سایرین گونه‌های تولید کننده فلاک را که ایجاد پلی‌هیدروکسی بوتیرات نمی‌نمودند، از لجن جدا نمودند [۲]. گر چه برخی از باکتریهایی که تولید پلی هیدروکسی بوتیرات نمی‌کنند نیز در ایجاد فلکولاسیون دخالت دارند ولیکن حضور برخی از مواد چسبنده در اغلب توده‌های فلوکه شده تائید کننده این است که گر چه این مواد منحصراً توجیه کننده مکانیسم فلکولاسیون نیستند ولی در آن نقش غالب را ایفا می‌کنند. در ضمن نشان داده شده است که پسودوموناد به توسط فیبریلهای به هم پیچیده شده و به صورت فلوکه نگه داشته می‌شود.

توگو و ایدا (۱۹۷۷) نشان دادند که یک نوع باکتری تولید کننده فلاک جدا شده از لجن فعال به توسط موکوپلی ساکارید به یکدیگر چسبیده شده‌اند. عموماً اینطور متصور است که گستره وسیعی از محصولات ذخیره‌ای ملکولها به صورت کپسول و یا لایه ژلاتینی لزج ترشح شده و پدیده فلکولاسیون را سبب می‌شوند [۲].

* نقش پلیمرهای خارج سلولی

همچنان که افزودن برخی از پلیمرهای تجاری (پلی‌الکترولیتها) به عنوان کمک منعقد کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد، پلیمرهای طبیعی نظیر پلی‌ساکاریدها نیز می‌تواند سبب فلکولاسیون خودبخودی شود. پلیمرهای تولید شده بیولوژیکی به صورگوناگون مثل کپسول، رشته‌ای و یا شبکه غشایی وجود دارند.

نحوه انجام پدیده فلکولاسیون در اثر پلیمرهای خارج سلولی بطور دقیق تعیین نشده است، اما به نظر می‌رسد که این پلیمرها به عنوان مواد چسبنده‌ای که بطور فیزیکی سبب به دام انداختن سلولهای مجاور می‌گردند، عمل می‌کنند. در برخی از شرایط فیبریلهای در هم پیچیده‌ای از مواد سلولزی نیز مسئول پایداری فیزیکی فلاک به شمار می‌روند. پلیمرهای خارج سلولی دارای تعداد زیادی از گروههای باردار (بطور مثال گروه کربوکسیل) هستند و بسیار تمایل به یونهای فلزات واسطه دارند. یکی از دلایل کاهش فلزات سنگین در سیستم لجن فعال را می‌توان درگیر شدن آن با اتصالات گروههایی مثل گروه کربوکسیل دانست. شکل ۲ بطور شماتیک نحوه اتصال فیبریلها و همچنین گروههای کربوکسیل موجود در پلیمرهای خارج سلولی را نشان می‌دهد.



شکل ۲ : شمای ساختار یک فلاک

کلی و گادی توده ژلاتینی[1] خارج سلولی کپسول ۵ نوع باکتری تولید کننده فلاک را جدا نموده و آن را به منظور تثبیت توده میکربی ناهمگن در حال تعلیق پس از گذراندن دوره لگاریتمی، به کشت مورد نظر افزودند. ولی فلکولاسیون صورت نپذیرفت. عمل پلیمرهای خارج سلولی بسته به مرحله رشد و نوع باکتری اختصاصی است. اکنون به نظر می‌رسد که تنها گونه خاصی از باکتریهای تولید کننده پلیمر مسئول ایجاد پدیده فلکولاسیون نیست. عموماً یک و یا دو گونه سهم عمده را در ایجاد پدیده مزبور بر عهده دارند که ممکن است این انواع بر اثر تغییر شرایط محیطی تغییر نمایند.

1- Extracellular Capsular Slimes

* تأثیر رقابتی حضور جمعیت میکروبی مختلط و متنوع

فلکولاسیون به ندرت در طی مطالعات بر روی سیستمهای ناپیوسته (Batch) با محیط کشت خالص مشاهده شده است. فرآیند فلکولاسیون در طی سیستمهای ناپیوسته برخی از اوقات ولی نه در همه موارد، هنگامی که توده میکروبی ناهمگن از لجن فعال با فلکولاسیون خوب تهیه شده باشد، مشاهده شده است. احتمال رخداد فلکولاسیون زمانی زیاد است که جمعیت میکروبی سیستم ناهمگن وجود داشته، روابط بین اجزای اکوسیستم به خوبی برقرار گردیده و منابع رشد محدود باشد. عموماً در حالت طبیعی (در کشت مختلط) میکروارگانیسمها بر خلاف کشت خالص میکروبی، نشان داده شده است که بسیاری از انواع سلولها ایجاد توده درهم پیچیده‌ای از رشته‌های پلی‌ساکارید می‌نمایند. این گلیکوکالیکس[1] سطح مؤثری را جهت چسبیدن سایر سلولها فراهم می‌آورد. همچنین سطح ویژه قابل توجهی جهت اتصال به گلیکوکالیکس سایر سلولها تأمین می‌گردد. از آنجاکه گلیکوکالیکس در کشتهای مخلوط میکروبی و نه در کشتهای خالص وجود دارد، این ایده که گلیکوکالیکس با مصرف کربن و منبع انرژی به عنوان یک مکانیسم محافظتی ایجاد شده و وجود آن نقش رقابتی با سایر میکروارگانیسمهای محیط دارد را تقویت می‌کند. به لحاظ اهمیت جمعیت میکروبی در فرآیند فلکولاسیون بیولوژیکی باید مطالعات را بر محیطهای کشت مختلط میکروبی متمرکز کرد، زیرا در مطالعات بر روی محیطهای کشت خالص رفتار طبیعی متابولیکی میکروارگانیسمها بر فرآیند منعکس نمی‌شود.

* تأثیر باکتریهای رشته‌ای و قارچها

باکتریهای رشته‌ای و قارچها می‌توانند نقش مفیدی را در شکل گیری فلاکها ایفا کنند. از طرفی حضور بیش از حد این باکتریها می‌تواند سبب ایجاد توده‌ای حجیم از باکتریها گردد. توده فلوکه شده کندتر از حالت رشد پراکنده سوبسترہ را مصرف می‌کند و در نتیجه سرعت حذف مواد آلی توسط آن نیز کمتر است. مورد اخیر به دو علت زیر است :

۱- بازدارندگی متابولیکی ناشی از پلیمرها

۲- در دسترس بودن کربن و مواد غذایی

1- Glycocalyx

منابع و مراجع :

1- Benefield, Larry, (1980). "Biological Process Design For Wastewater Treatment", Prentice-Hall, USA.

2- Gaudy, Gaudy, E. (1981). "Microbiology for Environmental Scientists And Engineers." McGraw-Hill, First Printing, Tokyo.

3- Steritt, R.M, Lester, J.N. (1988). "Microbiology for Environmental And Public Health Engineers". E. & F. N. SPON, New York.

4- Viessman, W., M. J.,(1985). "Water Supply & Pollution Control", First Edition, Harper & Row, New York.