

TEORI BIOFLOKULASI SEBAGAI DASAR PENGELOLAAN SISTEM LUMPUR AKTIF

Oleh : Ignasius D.A. Sutapa¹

Abstrak

Sistem lumpur aktif merupakan sistem yang paling banyak dipakai dalam pengolahan limbah cair. Penguasaan fenomena flokulasi dari lumpur aktif tersebut, yang menggambarkan suatu pertarungan ilmu pengetahuan dan teknologi, harus melalui pemahaman yang lebih baik mengenai struktur flok biologis dan evolusinya. Tiga teori yang ada selama ini belum dapat menjelaskan atau menyelesaikan semua permasalahan yang dihadapi oleh fenomena bioflokulasi. Hal ini menunjukkan tingkat kompleksitas yang tinggi dari sistem yang dipelajari serta diversitas parameter yang terkait. Namun demikian teori-teori tersebut memberikan akses kepada pemahaman dari sejumlah hasil penelitian yang diperoleh mengenai studi flok biologis. Akan tetapi masih tersisa sejumlah pertanyaan yang harus dijawab dalam rangka memahami fenomena bioflokulasi tersebut untuk keperluan teknis maupun konseptual.

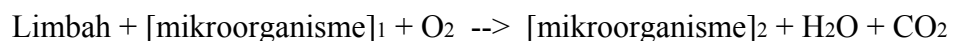
Kata kunci : bioflokulasi, flok, lumpur aktif

¹Peneliti Puslitbang Limnologi-LIPI, Cibinong

Pendahuluan

Pengolahan limbah dengan sistem lumpur aktif menggunakan suatu reaktor aerobik dengan biomassa tersuspensi. Pada

dasarnya sistem ini mereproduksi efek auto-purifikasi yang terjadi di sungai-sungai, dimana mekanismenya dapat digambarkan secara sederhana sebagai berikut :



Sistem tersebut diatas merupakan teknik yang paling banyak dipakai saat ini dalam pengolahan air limbah. Prinsip teknik ini adalah menginteraksikan dalam sebuah reaktor biologis teraerasi, air limbah dengan mikroorganisme tersuspensi yang memakan polusi tersebut. Mikroorganisme tersuspensi ini kemudian membentuk

flok-flok bakterien. Campuran masuk kemudian ke dalam bak pengendap dimana akan terpisahkan antara air bersih dengan mikroorganisme dalam lumpur. Lumpur ini pada umumnya sebagian dikembalikan ke bak pengendap untuk menjaga konsentrasi biomassa agar tetap konstan, sedangkan sisanya dibuang.

Tahap pemisahan biomassa /air bersih merupakan salah satu tahap yang sangat penting (kunci) agar stasiun pengolahan limbah dapat berfungsi dengan baik. Tahap ini yang dilakukan dengan fenomena pengendapan sederhana, sering terhalangi oleh buruknya kemampuan untuk tersedimentasi dari lumpur aktif yang menyebabkan tidak berfungsinya sistem seperti penolakan biomassa dan/ atau kesulitan untuk mengkoncentrasikan lumpur. Istilah anglosaxon "bulking" sering/biasa digunakan untuk mendiskripsikan tipe situasi ini yang perlu untuk dihindari. Untuk itu penguasaan fenomena flokulasi dari lumpur aktif tersebut, yang menggambarkan suatu pertarungan ilmu pengetahuan dan teknologi, harus melalui pemahaman yang lebih baik mengenai struktur flok biologis dan evolusinya.

Tulisan ini bertujuan untuk mengulas serta merangkum beberapa teori yang berkembang dalam memahami fenomena bio-flokulasi. Hal ini dalam rangka untuk mengidentifikasi beberapa informasi baru yang diperlukan untuk melengkapinya melalui kegiatan penelitian.

Teori Bioflokulasi

Dalam sebuah lumpur aktif, terjadi kohabitasi dari tiga bentuk pertumbuhan bakteri : pertumbuhan terdispersi, pertumbuhan terflokulasi dan pertumbuhan filamen (CANLER [1995], FNDAE [1990], ROQUES

[1980]). Selama fase pertumbuhan eksponensial bakteri-bakteri terdispersi dalam media kultur. Ukurannya yang sangat kecil membuatnya sulit untuk terendapkan. Pada saat masuk pada fase stasioner, bakteri-bakteri teraglomerasi dalam bentuk flok bakterien dengan ukuran yang memungkinkan untuk mengendap. Jenis flok ini sering disebut "jari sarung tangan" oleh karena bentuknya yang bertakuk/bergerigi. Akhirnya dalam fase respirasi endogen, bentuk terflokulasi bertahan namun flok tersebut lebih kecil ukurannya dan disebut berbentuk "kepala jarum". Kondisi terbaik untuk pemisahan/pengendapan terletak antara dua ekstrem tersebut di atas.

Beberapa teori berbeda telah dipostulatkan dalam rangka menjelaskan mekanisme bio-flokulasi dan khususnya kelemahan-kelemahannya :

1. Fenomena tarikan pada permukaan bakteri

Penganut teori ini menjelaskan bahwa bioflokulasi terjadi oleh karena predominasi dari fenomena tarikan pada permukaan dinding sel bakteri (FORSTER [1976], ERIKSSON and HARDIN [1984]). Dinding-dinding sel bakteri sebagian terbentuk dari protein. Asam-asam amino dari protein ini mempunyai sifat-sifat amfoter : muatan listrik bervariasi sebagai fungsi dari pH. Dalam hal ini, bakteri-bakteri memiliki potensial zeta tidak sama dengan nol

: nilai ini sedikit negatif pada pH kultur, artinya dekat dengan netralitas. Pada saat pH disamakan dengan titik isoelektrik, terjadilah anulasi muatan yang menyebabkan flokulasi. Komposisi ionogen utama dari dinding sel bakteri merupakan asam glukorinik. Namun demikian, potensial zeta dapat dianulir tanpa adanya flokulasi. Dengan demikian muatan pada permukaan dinding sel memainkan peranan akan tetapi tidak sendiri. Pada saat bakteri-bakteri mulai memproduksi eksopolimer, dan dengan adanya kation polivalensi (seperti asam-asam humik, fulfik ...), eksopolimer tersebut membentuk jembatan dengan muatan-muatan negatif permukaan bakteri dan terjadilah flokulasi. Kedua asam ini hanya merupakan hasil metabolisme ultim dari aktivitas bakteri. Polimer-polimer tersebut sesungguhnya mempunyai panjang rantai yang cukup (mencapai 50 mikrometer menurut GEESEY (1982)) untuk dapat menyebabkan terjadinya jembatan yang menghubungkan antar mikroorganisme. Diantara polimer-polimer ini, eksopolisakarid (kapsul dari bakteri tertentu atau gaine yang melingkari bakteri filamen tertentu) diyakini memiliki peran primordial (PAVONI et col., 1972).

Pada fase pertumbuhan eksponensial, tidak ada produksi eksopolimer dan bakteri-bakteri terdispersi dalam media kultur. Pada saat terjadi "bulking

filamen", mikroorganisme berbentuk filamen bekerja seperti makropolimer : sehingga flok menjadi sangat kompak dan tak terpadatkan untuk dapat mengendap. Bakteri filamen tertentu seperti *Sphaerotilus natans* mempunyai selaput (eksopolisakarid yang mengandung kation bivalensi) yang mengelilinginya (GEESEY, 1982) dan dengan melepaskan eksopolimer seluler yang banyak ke dalam media kultur membuat flok menjadi lebih padat (ERIKSSON and HARDIN, 1984).

2. Model Rangka Filamen

Dalam model ini (JENKINS et col. (1986), EDELIN (1993)), kapsul dari jenis bakteri tertentu memungkinkan untuk saling berhubungan dan membentuk massa gelatin cukup besar. Gaya-gaya pada permukaan dapat menjaga sel-sel bakteri berdekatan satu sama lain serta membuat hubungan secara stabil. Disisi lain, perpanjangan filamen-filamen polisakarid atau glukoprotein memungkinkan pertalian yang lebih kuat antara sel-sel yang mendukung pembentukan flok biologis. Dengan demikian bakteri-bakteri filamen berfungsi sebagai kerangka dari flok biologis tersebut. Dalam kasus ini, angka perbandingan yang baik antara bakteri non filamen dan bakteri filamen sangat menentukan. Untuk mendapatkan sebuah flok terstruktur, diperlukan jumlah bakteri filamen yang cukup, akan tetapi

jumlah yang berlebihan membuat flok-flok terhubungkan satu sama lain. Hal ini membuat luas permukaan spesifik menjadi semakin besar yang mengakibatkan sulitnya sedimentasi. Sejumlah peneliti telah membuat inventarisasi jenis-jenis bakteri filamen yang dijumpai pada saat terjadi bulking lumpur aktif (CANLER, 1995).

Dalam kasus ini, konsentrasi oksigen di pusat flok serta kuantitas substrat memungkinkan pertumbuhan dua tipe bakteri dalam proporsi yang berbeda. Pada saat konsentrasi oksigen menjadi rendah, jenis bakteri filamen tertentu lebih dominan oleh karena mereka memiliki afinitas yang kuat terhadap oksigen, terutama lebih kuat dari pada yang dimiliki oleh jenis bakteri non filamen. Pada konsentrasi oksigen tinggi, oksigen tidak lagi menjadi pembatas sehingga afinitas terhadap substrat yang lebih diperhitungkan : bakteri-bakteri non filamen tertentu memiliki afinitas terhadap substrat dibandingkan dengan bakteri filamen yang ada dalam media kultur, sehingga jenis bakteri non filamen lebih dominan. Dalam sebuah unit pengolahan air limbah, substrat pada umumnya tidak menjadi pembatas (kecuali pada beban organik rendah), sehingga konsentrasi oksigen di pusat flok

dapat menjadi faktor dominan yang mengendalikan keseimbangan filamen/non filamen, yang berarti juga pengendapan (ROCHE, (1989), SUTAPA (1996)). Eksopolisakarid pada permukaan dan sekeliling flok-flok dapat berperan penting dalam proses transfer oksigen ke dalam flok.

3. Teori Integral

Teori ini merangkum hampir semua pengetahuan yang kurang lebih telah dibuktikan sampai saat ini. Untuk menjelaskan bioflokulasi dan penyimpanannya, model ini berdasar pada kompetisi tiga kelompok bakteri dimana karakteristiknya ditampilkan dalam gambar 2. Tingkat pertumbuhan (μ), afinitas ($1/K_s$) untuk substrat atau oksigen dan resistensi terhadap kekurangan makanan (cadangan PHB atau polihidroksibutirat, contohnya) memungkinkan untuk membedakan kelompok yang akan mendominasi dalam lumpur aktif sesuai dengan kondisi hidup sel-sel bakteri. Sesungguhnya, tergantung dari kelompok dominan, tipe flokulasi terkait akan menentukan kemampuan lumpur aktif untuk mengendap. Tabel 1 merangkum tipe-tipe bakteri yang ada dalam lumpur aktif.

Tabel 1.: Karakteristik kelompok bakteri yang berperan dalam flokulasi

Kelompok	Tipe	μ	Afinitas tinggi untuk	Resistensi pada diet
α	pembentuk flok	tinggi	S	rendah
β	filamen A	tinggi	O ₂	rendah
γ	filamen B	rendah	S	tinggi

Tiga parameter tersebut berasal dari karakter fisiologis dan metabolis spesifik terhadap organisme-organisme yang berbeda ini. Sebagai contoh, selaput polisakarid yang melingkari bakteri filamen tertentu serta perbandingan luas permukaan/volume yang tinggi menjelaskan kemungkinan untuk menyimpan secara lebih mudah substrat (dengan mengadsorpsi pada selaput polisakarid) dibandingkan dengan bakteri lain, bahkan pada konsentrasi substrat yang rendah (GEESEY, 1982). Perbandingan luas permukaan/volume (dengan kapasitas transfer tinggi) merupakan hal yang tak dapat didiskusikan pada saat substratnya dalam bentuk terlarut atau pada saat salah satu faktor menjadi pembatas (konsentrasi rendah) (PALM et col., 1980). Contoh lain : kelompok γ memproduksi PHB dan polisakarid sebagai makanan cadangan, sedangkan kelompok α dan β hampir hanya memproduksi polisakarid. Produksi PHB memungkinkan penyimpanan metabolisme perantara seperti pyruvat yang memerlukan energi lebih. Kelompok γ menyimpan lebih banyak cadangan untuk jumlah konsumsi

energi yang sama sehingga dapat lebih dominan pada saat kondisi media kultur kurang menguntungkan untuk pertumbuhan bakteri (substrat tidak seimbang, kekurangan nitrogen) (ROQUES, 1980). Namun demikian, terlalu besarnya keragaman spesies non filamen yang ada dalam lumpur aktif tidak dapat diwakili hanya oleh kelompok α pada kondisi kultur. Demikian juga kelompok β dan γ tidak dapat mewakili golongan bakteri filamen.

Parameter Lain Yang Mempengaruhi Bioflokulasi

1. PH

PAVONI et col. (1972) telah membuktikan bahwa polimer-polimer yang diambil dari lumpur aktif tidak mampu menyebabkan flokulasi dari suatu koloid mineral (kaolonit) pada pH asam (pH antara 2 s/d 4). Di atas pH 4, flokulasi signifikan terjadi. Kuantitas flokulasi ditentukan dengan mengukur turbiditas bagian atas endapan (*surrogate*). Perlu dicatat bahwa metode ini tidak selalu dapat digunakan pada lumpur aktif, dalam kasus flok tipe

kepala jarum, pengendapan dapan terjadi dengan baik tetapi dengan surnageant keruh (JENKINS et col., 1986). Pada saat pH diatas 4, polimer eksoseluler dan kaolinit bermuatan negatif. Struktur molekul tersebut lebih longgar serta ekspansi steriknya mendukung pembentukan jembatan penghubung. Terbentuklah flok, dimana koloid mineral terperangkap dalam sebuah matrik polimer eksoseluler dan menyebabkan pengendapan.

Untuk membuktikan hipotesa "jembatan penghubung", PAVONI et col. (1972) melakukan ultra-sentrifugasi dari kultur campuran, surnageant mengandung polimer eksoseluler sedangkan endapannya yang mengandung bakteri disuspensikan lagi dengan larutan NaCl 0.5 %. Mulai pH 7 penurunan signifikan turbiditas terlihat pada saat penambahan polimer eksoseluler dilakukan. Bakteri serta polimer semakin bermuatan negatif ketika pH naik. Satu-satunya kemungkinan untuk menjelaskan interaksi ini adalah keberadaan interaksi fisik (jembatan penghubung) antara dinding sel dan polimer. Polimer-polimer tersebut membentuk jembatan antara gugus fungsional bebas yang terletak pada permukaan membrane bakteri (koagulasi) dan jembatan-jembatan lain antara rantai-rantai polimer berbeda (flokulasi). Berdasarkan penelitian PAVONI et col. (1972) tersebut, efek dari polimer-polimer ini tidak tergantung dari potensial zeta sel.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa anulasi muatan tidak diperlukan untuk pembentukan flok biologis. Efek pH lebih sulit untuk dijelaskan dalam kasus lumpur aktif. Hal ini disebabkan adanya sejumlah ion dengan multivalensi dan sejumlah makromolekul eksoseluler dalam lumpur aktif tersebut.

2. Kation bivalensi

Kation-kation bivalensi memungkinkan pembentukan jembatan antara struktur-struktur yang bermuatan negatif, artinya antara bakteri-bakteri dengan polimer-polimer, atau antara polimer-polimer itu sendiri. Adsorpsi selektif dari ion-ion kalsium oleh polimer yang diekstraksi dari lumpur aktif telah dibuktikan (GEESEY, 1982). Ion-ion kalsium memiliki afinitas lebih besar terhadap polimer-polimer eksoseluler daripada terhadap lumpur aktif. Hal ini tentu saja disebabkan oleh jumlah atau jenis/sifat kimiawi dari situs yang tersedia. Dengan menambahkan EDTA ke dalam lumpur aktif, fungsi kohesi kation bivalensi bagi kultur tersebut telah dibuktikan (ERIKSSON et col., 1991). Hal ini dapat dijelaskan oleh karena polimer-polimer eksoseluler dan bakteri-bakteri, yang bermuatan negatif pada pH lumpur aktif, terdispersikan oleh tolakan elektostatik yang kuat dengan absennya kation-kation bivalensi yang dapat menganulir muatan-muatan tersebut serta membentuk

jembatan antara polimer dan bakteri (ERIKSSON et col., 1984).

3. Perbandingan C/N/P

Mikroorganisme memerlukan sumber makanan dasar seperti karbon (C), nitrogen (N) dan fosfor (P) untuk dapat berkembang biak dengan baik. Suatu perbandingan nilai C/N/P sama dengan 100/5/1 dianggap sebagai kondisi optimum untuk kultur bakteri (ROQUES, 1980). Perbandingan ini menyatakan keseimbangan nutrisi dari substrat. Kelebihan materi karbon yang mudah terasimilasi (seperti gula) dapat menyebabkan berkembangbiakan bakteri filamen seperti limbah buangan yang kaya akan laktosa (ECKENFELDER, 1982). Secara umum, substrat yang kurang seimbang mengakibatkan berkembangbiakan bakteri filamen tersebut (ALBAGNAC et col., 1980).

Kesimpulan

Dari tulisan ini terlihat bahwa tak satupun dari tiga teori yang ada selama ini dapat menjelaskan atau menyelesaikan semua permasalahan yang dihadapi oleh fenomena bioflokulasi. Hal ini menunjukkan tingkat kompleksitas yang tinggi dari sistem yang dipelajari serta diversitas parameter yang terkait. Namun demikian teori-teori tersebut memberikan akses kepada pemahaman dari sejumlah hasil penelitian yang diperoleh me-

ngenai studi flok biologis. Beberapa peneliti juga telah mempelajari pengaruh sejumlah parameter terhadap evolusi flokulasi serta pengendapan lumpur aktif. Akan tetapi masih tersisa sejumlah pertanyaan yang harus dijawab dalam rangka memahami fenomena bioflokulasi tersebut untuk keperluan teknis maupun konseptual.

Daftar Pustaka

ALBAGNAC G., MORFAUX J.N. (1980) : "Tratabilite comparee en aeration prolongee et en contact-stabilisation des eaux residuelles de brasseries.", *La Tribune du Cebedeau*, No. 435, 63-72.

CANLER J.P. (1995) : "Introduction a l'ecologie des boues activees. Problemes biologiques.", *Cours de l'ENGEES, CEMA-GREF*, 55p.

ECKENFELDER W.W. (1982) : "Gestion des eaux usees urbaines et industrielles.", *Techniques et Documentation, Lavoisier*.

EDELIN F. (1993) : "L'epuration biologique des eaux.", *Techniques et Documentation, Cebedoc editeur, Lavoisier*.

ERIKSSON L, HARDIN A.M. (1984) : "Settling properties of activated sludge related to floc structure.", *Water Science and Technology*, Vol.16, 55-67.

- ERIKSSON L, ALM B. (1991) :** "Study of flocculation mechanisms by observing effects of a complexation agent on activated sludge properties.", *Water Science and Technology*, Vol.24, 21-28.
- FNDAE, Ministere de l'Agriculture et de la Foret (1990) :** "Guide technique sur le foisonnement des boues actives.", *Documentation Technique FNDAE-CEMAGREF*, No.8.
- FORSTER C.F. (1976) :** "Activated sludge surfaces in relation to the sludge volume index.", *Wat. S. A.*, Vol.2, 119-125.
- GEESEY G.G. (1982) :** "Microbial exopolymers : ecological and economic considerations.", *ASM News*, Vol.48, No.1, 9-14.
- JENKINS D., RICHARD M. GG., DAIGGER G.T. (1986) :** "Manual of the causes and control of activated sludge bulking and foaming.", *Water Research Commission, USEPA*.
- PALM J.C., JENKINS D., PARKER D.S. (1980) :** "Relationship between organic loading, dissolved oxygen concentration and sludge settleability in the completely mixed activated sludge process.", *Journal of Water Pollution Control Federation*, Vol.52, 2484-2506.
- PAVONI J.L., TENNEY M.W., ECHELBERGER Jr. W.F. (1972) :** "Bacterial exocellular polymers and biological flocculation.", *Journal of Water Pollution Control Federation*, Vol.44, No.3, 414-431.
- ROCHE N. (1989) :** "Influence de l'hydrodynamique des bassin d'aerations sur la decantabilite des boues actives.", *PhD Thesis, INPL, Nancy-France*.
- ROQUES H. (1980) :** "Fondements theoriques du traitement biologique des eaux.", *Techniques et Documentation, Lavoisier*, Vol.1 & Vol.2.
- SUTAPA I. (1996) :** "Proprietes physico-chimiques et decantabilite des boues actives en relation avec le transfert d'oxygen et la bio-flocculation.", *PhD Thesis, INPL, Nancy-France*.