

Penghambatan Pertumbuhan Populasi Mikroba Bentuk Filamen dengan Sistem Pengolahan Limbah Anaerobik-Aerobik

I Made Sudiana

Pusat Penelitian Biologi-LIPI. E-mail: sudianai@yahoo.com

Diterima Agustus 2004 dan disetujui untuk diterbitkan Mei 2005

Abstract

Bulking sludge is a common phenomenon in wastewater treatment plant (WWTP), of which due to excessive growth of filamentous bacteria. Quantity and intensity of organic substrate loading, mode of reactor operation namely aerobic, frequency of anaerobic-aerobic phase determines species and population of filamentous bacteria. Poor organic substrate input and sludge only exposed with aerobic phase appeared to stimulate growth of filamentous bacteria 021 N and 041 N types, Sphaerotilus natans, Microthrix parvicella, Nostocoida limicola, Thiothrix sp. Nocardia group, Flexibacter sp., Beggiota sp. and Haliscomenobacter hydrossis. Increasing of organic loading and sludge exposed with frequent anaerobic-aerobic phase effectively suppressed excessive growth of Type 021 N, 041 N and Microthrix parvicella. Thus result is better in sludge sedimentation indicated by a decline sludge volume index (SVI).

Key words: *Filamentous bacteria, anaerobic-aerobic phase*

Pendahuluan

Permasalahan yang umum dijumpai dalam unit pengolahan limbah (UPL) adalah sedimentasi lumpur aktif yang terhambat (Madoni *et al.*, 2000). Fenomena tersebut disebabkan oleh meningkatnya populasi Bakteri Bentuk Filament (BBF), yang umumnya disebut sebagai *filamentous bacteria* (Eikelboom dan van Buijsen, 1981). Dokumentasi tentang *filamentous bacteria* dalam UPL sangat intensif. Jenis yang banyak ditemukan adalah *Microthrix parvicella*, *Sphaerotilus natans*, *Nostocoida limicola*, *Thiothrix* spp., tipe 021N (Beer *et al.*, 2002), *Haliscomenobacter*, *Nocardia* sp., *Flexibacter* sp., *Beggiota* sp. (Van der Waarde *et al.*, 1998). Komposisi jenis BBF dalam UPL dipengaruhi oleh jenis senyawa organik yang diolah, serta tipe proses UPL (Yamamoto-Ikemoto *et al.*, 1998). Di negara maju seperti Denmark, Inggris, Italia UPL sering mengalami *sludge bulking* dan BBF yang umum ditemukan adalah *Microthrix parvicella*, *Nocardia* sp. dan tipe 021 N (Nielsen *et al.*, 1998). BBF di masing-masing negara mempunyai ciri khas, seperti di Denmark BBF didominasi oleh tipe 021 N, tipe ini juga umum ditemukan di Jepang (Yamamoto-Ikemoto *et al.*, 1998). Banyak UPL di Indonesia yang mempunyai masalah sama, tetapi belum banyak informasi yang diketahui tentang penyebab utama terbentuknya dominansi jenis BBF pada UPL. Umumnya UPL yang menerapkan sistem aerobik dengan beban senyawa organik dan konsentrasi oksigen terlarut rendah berpotensi mengalami sedimentasi lumpur aktif terhambat (*bulking sludge*). BBF juga mempunyai karakter yang mampu membentuk cadangan makanan, seperti polihidroksialkanoat (Eikelboom dan Van Buijsen, 1981), sehingga mampu bertahan pada UPL dengan input senyawa organik yang rendah. Di dalam UPL, komunitas BBF akan berkompetisi dengan bakteri pembentuk flok (BPF). Dominansi BPF terhadap BBF akan menyebabkan pengendapan lumpur aktif yang lebih cepat, sehingga banyak penelitian yang ditujukan untuk mengetahui karakter fisiologi BBF dan faktor lingkungan yang berpengaruh terhadap terbentuknya komunitas BBF.

Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh senyawa organik dan pergantian kondisi aerobik menjadi anaerobik-aerobik terhadap populasi bakteri bentuk filamen yang menyebabkan sedimentasi lumpur aktif terhambat.

Materi dan Metode

Dalam penelitian ini digunakan lumpur aktif yang diambil dari UPL pengolahan limbah domestik yang menerapkan sistem anaerobik-aerobik. Lumpur aktif yang diambil berasal dari akhir fase aerobik. Penelitian ini menggunakan sistem Anaerobik-aerobik SBR (*Sequential Batch Reactor*) yaitu sistem yang menerapkan kondisi anaerobik-aerobik pada satu tangki. Reaktor seperti ini mempunyai keuntungan mudah dioperasikan. Reaktor terbuat dari tabung baja *stainless steel* dengan total volume 20 l, dan volume kerja 18 l. Kondisi anaerobik dibuat dengan mengalirkan gas N₂ pada awal fase anaerobik, kemudian reaktor ditutup untuk menghindari kontak dengan udara luar. Kondisi aerobik dibuat dengan mengalirkan udara ke dalam reaktor dengan menggunakan pompa udara. Untuk mengatur kondisi substrat homogen, lumpur aktif diaduk dengan menggunakan *stirer*. Pada akhir fase aerobik *stirer* dimatikan untuk memudahkan terjadinya pengendapan lumpur aktif. Sekitar 9000 ml supernatan pada akhir fase sedimentasi dibuang dan diganti dengan air yang baru. Skema operasi reaktor tertera pada tabel 1. OPERASI-1, 2 dan 3 dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh kondisi aerobik, anaerobik-aerobik dan beban senyawa organik terhadap pertumbuhan populasi bakteri bentuk filamen selama periode aklimasi.

Tabel 1. Kondisi operasi reaktor pada OPERASI-1,2 dan 3
Table 1. Condition of the reactors during operation 1, 2 and 3

No.	Uraian	OPERASI-1	OPERASI-2	OPERASI-3
1	Anaerobik	0 jam	2 jam	8 jam
2	Aerobik	23 jam	21 jam	15 jam
3	Sedimentasi	1 jam	1 jam	1 jam
4	Beban senyawa organik	0,2 kg.m ⁻³ .hari ⁻¹	0,4 kg.m ⁻³ .hari ⁻¹	0,5 kg.m ⁻³ .hari ⁻¹
5	Hari ke:	0-30	31-60	61-90

Komposisi air limbah sintetik pada OPERASI-1 adalah 46,2 % CH₃COONa, 10 % CH₃COOH dan 20 % C₆H₁₂O₆. Alkalinitas diatur dengan menggunakan 1,2 % Fe₂SO₄, 1 % KH₂PO₄, 0,8 % K₂HPO₄, 1,2 % CaSO₄, dan 0,6 % MgSO₄. Serta sumber N berupa 3 % (NH₄)₂SO₄, pepton dan ekstrak khamir masing-masing sebanyak 3%. Komposisi air limbah pada OPERASI-2 dan 3, sama dengan OPERASI-1 hanya Fe₂SO₄ diganti dengan MnSO₄.

Penentuan MLSS Filter dikeringkan selama 4 jam pada suhu 105°C, disimpan dalam eksikator, dan ditimbang bobotnya. Sebanyak 15 ml sampel disaring dengan menggunakan bantuan pompa hampa. Setelah itu filter dimasukkan ke dalam oven selama 4 jam pada suhu 105°C, kemudian dihitung MLSS dengan mencari selisih antara berat kering filter sebelum dan setelah diberi Lumpur aktif, dibagi dengan volume sampel (APHA, 1992).

Sludge volume index (SVI) merupakan indikator kecepatan lumpur aktif mengendap. SVI ditentukan dengan menghitung volume lumpur aktif yang mengendap selama 30 menit (APHA, 1992).

Monitoring Aktivitas lumpur aktif dalam menurunkan kandungan senyawa organik limbah dilakukan setiap 3 hari yaitu dengan mengukur konsentrasi senyawa organik total di dalam air limbah. Pengukuran dilakukan pada awal fase anaerobik, akhir fase anaerobik dan aerobik, dengan menggunakan alat TOC 4100 SHIMADZU.

Identifikasi bakteri bentuk filamen dilakukan mengikuti Eikelboom dan Van Buijsen (1981), yaitu dengan pengamatan morfologi yang meliputi panjang dan diameter sel, septa, inklusi sel (keberadaan granula polihidroksi butirir, granula sulfur dan polifosfat), percabangan sel, keberadaan pertumbuhan terlekat (*attach growth*) pergerakan yang diamati dibawah mikroskop cahaya (Olympus BH2) dengan perbesaran 500-1000 kali. Untuk mengetahui karakteristik metabolit di dalam sel, maka dilakukan pengecatan sulfur Nile Blue A, dan Neisser berturut-turut untuk mengetahui adanya granula sulfur,

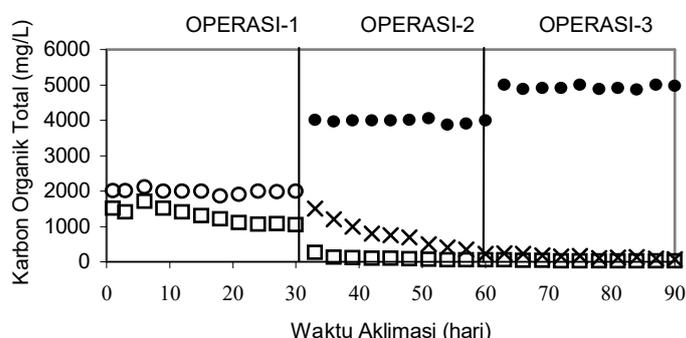
polihidroksibutirat, dan poliposfat di dalam sel (Eikelboom dan Van Buijsen, 1981; Sudiana *et al.*, 1999), dan pengecatan gram untuk penentuan sifat dinding sel. Analisa kualitatif bakteri bentuk filamen dilakukan mengikuti Eikelboom dan Van Buijsen (1981).

Hasil dan Pembahasan

Pada awal kultivasi lumpur aktif absorpsi substrat sangat sedikit, kemudian meningkat setelah 10 hari. Peningkatan tersebut akibat meningkatnya biomassa dan adaptasi mikroba dengan kondisi laboratorium. Beban senyawa organik yang sangat rendah pada OPERASI-1 menyebabkan pertumbuhan biomassa yang lambat. Akibat ketersediaan senyawa organik yang rendah menyebabkan sel lebih sulit mendapatkan substrat. Dalam kondisi seperti itu mikroba yang mempunyai luas ratio permukaan sel dengan volume sel yang tinggi mendapatkan keuntungan (Mino *et al.*, 1995). Kemampuan absorpsi substrat juga dipengaruhi oleh komposisi jenis komunitas fungsional yang terbentuk.

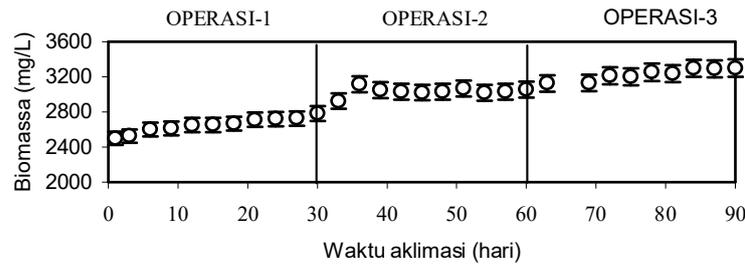
Pada skala UPL, aklimasi mikroba dengan menggunakan substrat glukosa dan asetat diharapkan membentuk komunitas yang efektif menggunakan senyawa organik hasil degradasi dan fermentasi senyawa polimer yang terdapat di dalam saluran pembuangan limbah rumah tangga. Aklimasi lumpur aktif dengan senyawa tersebut pada kondisi laboratorium belum menunjukkan hasil optimal. Pada kondisi aerobik substrat tersebut masih banyak yang belum digunakan oleh sel. Fenomena tersebut dapat disebabkan oleh kelarutan dan difusi oksigen yang terbatas, yang dapat masuk ke dalam gumpalan lumpur aktif, sehingga kondisi yang terbentuk tidak optimal untuk penyerapan substrat.

Perubahan kondisi menjadi anaerobik-aerobik (OPERASI-2 dan 3) mampu menstimulasi absorpsi substrat. Peningkatan beban senyawa organik dari 0,2 menjadi 0,4 kg/m³/hari menyebabkan substrat yang tersedia meningkat dan menyebabkan sel lebih mudah mendapatkan makanan. Fenomena peningkatan absorpsi juga dapat disebabkan oleh kondisi anaerobik, yang memungkinkan terjadinya fermentasi glukosa menjadi asam organik seperti asetat, laktat dan propionat (Satoh *et al.*, 1992). Produk fermentasi selanjutnya sangat mudah digunakan oleh mikroba pembentuk flok (Sudiana *et al.*, 1998; Sudiana *et al.*, 1999). Peningkatan beban senyawa organik dan perubahan mode operasi reaktor menjadi anaerobik-aerobik, juga menyebabkan perubahan komposisi mikroba (Lotter dan Murphy, 1998). Absorpsi senyawa organik terbesar terjadi pada kondisi anaerobik (gambar 1). Perubahan pola absorpsi tersebut dimungkinkan oleh pembentukan komunitas mikroba pengakumulasi poliposfat dan mikroba pembentuk flok (Eikelboom *et al.*, 1998). Perubahan komposisi komunitas tersebut dapat membantu penurunan nutrisi fosfat di dalam air buangan (Sudiana *et al.*, 1998).



Keterangan: ○ aerobik awal, □ aerobik akhir, X anaerobik akhir, ● anaerobik awal.

Gambar 1. Profil senyawa karbon total selama waktu aklimasi.
Figure 1. Profile of total carbon compound during acclimation period



Gambar 2. Profil biomassa selama kultivasi
Figure 2. Profile of Biomass during cultivation

Terjadi peningkatan biomassa lumpur aktif selama aklimasi (gambar 2) disebabkan oleh peningkatan beban senyawa organik. Sebagian besar biomassa yang terbentuk merupakan mikroba yang mampu menggunakan asetat atau glukosa sebagai sumber utama karbon. Jenis dan jumlah senyawa karbon, mikronutrien dan kondisi aklimasi lumpur aktif menentukan komposisi jenis komunitas mikroba dalam unit pengolahan limbah (Mino *et al.*, 1995).

Diversitas mikroba bentuk filamen selama kultivasi sangat heterogen. Ditemukan sekitar 9 jenis BBF yaitu tipe 021 N dan 041 N, *Sphaerotilus natans*, *Microthrix parvicella*, *Nostocoida limicola*, *Thiothrix* sp. dan grup *Nocardia*, *Flexibacter* sp., *Beggiota* sp., *Haliscomenobacter hydrossis*. Karakter morfologi dan fisiologi menentukan kecepatan absorpsi jenis substrat dan menentukan kemampuan sedimentasi lumpur aktif (Yamamoto-Ikemoto *et al.*, 1998).

Pada tipe 021 N gram negatif, Neisser negatif, Uji-S positif. Bentuk filamen agak melengkung, *non-motile* (tidak bergerak). Panjang filamen sekitar 500-1000 μm . Bentuk sel bervariasi. Bentuk persegi panjang, ukuran terpendek sekitar panjang 0,4-0,7 μm , dengan diameter sekitar 1,8-2,2 μm . Bentuk sel besar seperti *disk* atau persegi panjang, dengan panjang sel sekitar 2,0-3,0 μm . Tidak ditemukan lapisan luar (*sheath*), dan percabangan. Kadang-kadang ditemukan bagian sel yang sangat mengkilat. Banyak dijumpai pertumbuhan sel terlekat, yang bersifat gram negatif. Septa sel kelihatan jelas, kadang-kadang dijumpai granula sulfur.

Pada tipe 041 N gram positif, Neisser negatif, bentuk filamen lurus, kadang-kadang agak melengkung, filamen *non-motile* (tidak bergerak), bentuk sel persegi panjang, panjang 200-300 μm , ukuran diameter sekitar 1,0-1,4 μm , panjang sel sekitar 0,7-2,3 μm , dikelilingi oleh lapisan luar (*sheath*), kadang-kadang ditemukan percabangan, banyak dijumpai pertumbuhan sel terlekat, yang bersifat gram negatif. Septa sel kelihatan jelas, kadang-kadang dijumpai granula sulfur.

Pada *Sphaerotilus natans* gram negatif, Neisser negatif. Bentuk filamen agak melengkung, *non-motile* (tidak bergerak). Filamen banyak yang keluar dari gumpalan bakteri (*bacterial flock*). Panjang filamen sekitar 500-1000 μm . Bentuk sel bervariasi. Bentuk persegi panjang, atau kubus, dengan panjang sekitar 1,5-5,0 μm , dengan diameter sekitar 1,2-2,0 μm . Ditemukan lapisan luar (*sheath*) dengan percabangan, dan kadang-kadang dengan granula polihidroksibutirat.

Pada *Microthrix parvicella* gram positif, Neisser positif, Uji-S negatif. Bentuk filamen sangat melengkung, *non-motile* (tidak bergerak). Panjang filamen sekitar 200-400 μm , dengan diameter sekitar 0,5 μm . Tidak ditemukan septa dan percabangan. Ada beberapa pertumbuhan sel terlekat. Sering ditemukan granula poliposfat.

Pada *Nostocoida limicola* gram positif, Neisser positif dan berwarna biru-keputihan, Uji-S negatif. Bentuk filamen sangat melengkung, *non-motile* (tidak bergerak). Panjang filamen sekitar 100-300 μm , dengan diameter sekitar 0,6-0,7 μm . Tidak ditemukan septa dan percabangan. Ada beberapa pertumbuhan sel terlekat. Tidak ditemukan granula polifosfat.

Pada *Thiothrix* sp gram negatif, Neisser negatif, Uji-S positif. Bentuk filamen agak melengkung, *non-motile* (tidak bergerak). Panjang filamen sangat bervariasi, yaitu sekitar 50-500 μm . Bentuk sel bervariasi. Bentuk kubus, panjang 0,4-1,5 μm . Tidak ditemukan lapisan luar (*sheath*), dan percabangan. Septa sel tidak kelihatan jelas.

Pada grup *Nocardia* gram positif, Neisser negatif, Uji-S positif. Bentuk filamen agak melengkung, *non-motile* (tidak bergerak). Panjang filamen pendek yaitu < 100 μm , dengan diameter 0,5 μm . Tidak ditemukan septa dan percabangan. Tidak ada pertumbuhan sel terlekat. Tidak ditemukan lapisan luar (*sheath*).

Pada *Flexibacter* sp. gram negatif, Neisser negatif, Uji-S negatif. *Motile* (bergerak). Filamen sering kelihatan mengambang bebas. Tidak ditemukan granula sulfur. Bentuk filamen melengkung, panjang < 200 μm .

Pada *Beggiota* sp. gram negatif, Neisser negatif, Uji-S positif. Bentuk filamen agak melengkung, *non-motile* (tidak bergerak). Panjang filamen < 200 μm . *Motile* (bergerak). Banyak dijumpai granula sulfur. Bentuk sel sangat bervariasi. Septa sel tidak kelihatan jelas.

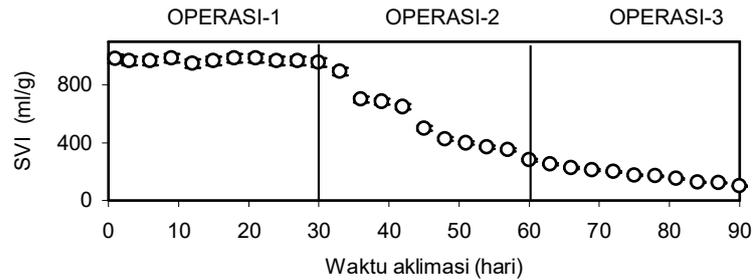
Pada *Haliscomenobacter hydrossis* gram negatif, Neisser negatif, Uji-S positif. Bentuk filamen lurus, ukuran pendek < 100 μm . Bentuk filamen menyebar keluar dari gumpalan komunitas bakteri. Ditemukan lapisan luar (*sheath*), dan tidak ada percabangan dan granula sulfur, polihidroksialkanoat dan poliposfat. Diameter sel sekitar 0,3 μm . Jarang ditemukan pertumbuhan sel terlekat (*attach growth*).

Komposisi komunitas BBF tergantung kepada periode kondisi aerobik, frekuensi kondisi anaerobik-aerobik (tabel 2). Pada awal aklimasi, konsentrasi substrat di dalam larutan terbatas dan pada kondisi tersebut bakteri pembentuk flok tidak dapat tumbuh optimal. Kondisi seperti itu dimanfaatkan oleh BBF untuk tumbuh dan berkembang, sehingga komunitas mikroba lumpur aktif di dominasi oleh BBF. Keberadaan Fe di dalam air limbah memacu pertumbuhan BBF tipe 021 N (Yamamoto-Ikemoto *et al.*, 1998). Fenomena tersebut terlihat jelas pada OPERASI-1. Pada kondisi senyawa organik terbatas dan keberadaan ion Fe, komunitas BBF didominasi oleh tipe 021 N. Fenomena serupa dilaporkan oleh Yamamoto-Ikemoto *et al.* (1998). Tipe 021 N menjadi dominan karena kemampuannya menggunakan ion Fe sebagai sumber energi. Disamping itu tipe 021 N mampu mengakumulasi polifosfat dan polihidroksibutirat yang dapat digunakan sebagai sumber fosfat dan karbon pada saat lingkungan yang defisit senyawa tersebut. Hal tersebut membuktikan dominansi tipe 021 N pada ekosistem dengan nutrisi defisit. Peluang penekanan populasi tipe 021 N adalah dengan meninggikan kandungan sumber karbon dan membatasi ketersediaan unsur Fe di dalam limbah. Maka OPERASI 2 dilakukan untuk menekan populasi BBF yang dominan pada OPERASI-1.

Tabel 2. Komunitas bakteri bentuk filamen
Table 2. Communities of filamentous bacteria

No.	Nama jenis	OPERASI-1	OPERASI-2	OPERASI-3
1	Tipe 021 N	++	+	-
2	Tipe 041 N	++	+	-
3	<i>Sphaerotilus natans</i>	+++	+	+
4	<i>Microthrix parvicella</i>	+++	+	-
5	<i>Nostocoida limicola</i>	+	+	-
6	<i>Thiothrix</i> sp.	++	+	-
7	<i>Nocardia</i> sp.	++	+	-
8	<i>Flexibacter</i> sp.	+	+	+
9	<i>Beggiota</i> sp.	++	+	-
10	<i>Haliscomenobacter hydrossis</i>	+	+	+

Keterangan : +++, populasi lebih dari 75 %, ++ lebih dari 50 %, + lebih dari 25 %, dan - populasi sangat jarang



Gambar 3. Profile *Sludge Volume Index* (SVI) selama kultivasi
 Figure 3. *Sludge Volume Index* (SVI) profile during cultivation

Peningkatan beban senyawa organik, perubahan operasi dari sistem aerobik menjadi sistem anaerobik-aerobik, dan penggantian Fe dengan Mn efisien menekan populasi BBF terutama tipe 021 N. Penekanan populasi BBF diikuti oleh pembentukan komunitas mikroba pembentuk flok yang menjadi dominan pada OPERASI 1-2. Fenomena tersebut menyebabkan percepatan sedimentasi lumpur aktif dan struktur lumpur aktif menjadi lebih kompak. Yang pada akhirnya mempercepat proses sedimentasi.

Kesimpulan

Peningkatan beban senyawa organik dan perlakuan perubahan kondisi aerobik menjadi anaerobik efektif menekan populasi BBF. Pengaruh senyawa organik dan pergantian kondisi aerobik menjadi anaerobik-aerobik terhadap populasi bakteri bentuk filamen menyebabkan sedimentasi lumpur aktif terhambat.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Prof. Dr. Takashi Mino, dan Dr. Hiroyashu Satoh dari University of Tokyo, Jepang atas bantuan fasilitas penelitian.

Daftar Pustaka

- American Public Health Association. 1992. *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*, 18th Ed., American Public Health Association, Washington D.C.
- Beer M, EM Seviour, Y Kong, M Cunningham, LL Blackall, and R J Seviour . 2002. Phylogeny of the filamentous bacterium Eikelboom Type 1851, and design and application of a 16S rRNA targeted oligonucleotide probe for its fluorescence in situ identification in activated sludge *FEMS Microbiology Letters* 207: 179-183.
- Eikelboom DH, A Andreadakis, and K Andreasen . 1998. Survey of filamentous populations in nutrient removal plant in four European Countries. *Wat. Sci. Tech.* Vol 37, No. 4-5: 281-289.
- Eikelboom DH, and HJJ Van Buijsen. 1981. *Microscopic sludge investigation manual*. IMG TNO Report. No. 94a. TNO Research Institute for Environmental Hygiene, Delft. 165 pp
- Lotter, L. H. and M. Murphy. 1998. Microscopic evaluation of carbon and phosphorus accumulation in nutrient removal activated sludge plants, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 20, No.4/5, IAWPRC, Great Britain: 37- 49
- Madoni P, D Davolli, and G Gibin. 2000. Survey of filamentous microorganisms from bulking and foaming activated sludge plants in Italy. *Wat. Res.* Vol. 34, No. 6: 1767-1772

- Mino, T., H. Satoh, and T. Matsuo. 1995. Metabolism of different bacterial populations in enhanced biological phosphate removal processes. *Wat. Sci. Tech.* Vol 29, No. 7: 67-70.
- Nielsen PH, K Andreasen, M Wagner, LL Blackall, H Lemmer, and RJ Seviour. 1998. Variability of Type 021 N in activated sludge as determined by in-situ substrate uptake and in-situ hybridization with rRNA targeted probes. *Wat Sci Tech.* Vol 37, No. 4-5: 423-430
- Satoh, H., T. Mino, and T. Matsuo. 1992. Uptake of organic substrate and accumulation of polyhydroxyalkanoate granule in *Acinetobacter spp*, isolated from activated sludge, *FEMS Microbiol. Lett.*, Vol. 94: 171-174
- Sudiana. I.M, Mino. T., Satoh.H, and T. Matsuo. 1998. Morphology, *In-situ* identification with rRNA targeted probe and respiratory quinone profile of enhanced biological phosphorous removal sludge. *Wat. Sci. Tech.* Vol: 38. No. 8-9: 69-76.
- Sudiana. I.M, Mino. T., Satoh. H, Nakamura. K., and Matsuo. 1999. Metabolism of enhanced biological phosphorous removal and non-enhanced biological phosphorous removal sludge with acetate and glucose as carbon sources. *Wat. Sci Tech.* Vol 39: 29-35.
- Van der Waarde JJ, B Geurkink, M Hessen, and G Heijnen. 1998. Detection of filamentous and nitrifying bacteria in activated sludge with 16 S RNA probes. *Wat Sci Tech.* Vol 37, No. 4-5: 475-479
- Yamamoto-Ikemoto R, S Matsui, T Komori, and EK Bosque-Hamilton. 1998. Control of filamentous bulking and interaction among sulfur oxidation-reduction and iron oxidation-reduction in activated sludge using iron coagulant. *Wat Sci Tech.* Vol 38, No. 8-9: 9-17