

Reduksi Energi Pengolahan Air Limbah di Kawasan Industri Dengan Implementasi Teknologi *Food Chain Reactor* (Studi Kasus : Kawasan Industri Jababeka Bekasi)

Temmy Wikaningrum^{1*}, Rijal Hakiki²

^{1,2}Environmental Engineering Department, President University, Cikarang

*Koresponden email: temmy@president.ac.id

Diterima: 11 Juni 2020

Disetujui: 24 Juni 2020

Abstract

Biological-aerobic process is a technology that is often chosen to treat wastewater in industrial areas, especially industries related to food industries. Compared to chemical treatment and advanced treatment, biological treatment is relatively more efficient in the costs required. However, in conventional biological treatment the amount of energy consumption in the process is a major cost component that it becomes one of the challenges in implementing this technology. This paper contains a review of the implementation of the Food Chain Reactor (FCR) technology in treating industrial area wastewater, focusing on an overview of energy consumption compared to conventional biological-aerobic treatment of oxidation ditch (OD). FCR is a wastewater treatment plant (IPAL) that combines Integrated Fixed Film Activated Sludge (IFAS) technology and technology that resembles Constructed Wetland, thus enabling the simultaneous physical, biological and biochemical treatment processes within the reactor. In this case study, the implementation succeeded in showing a reduction in energy consumption by 46.4% while maintaining an efficiency decrease in BOD by 83% and efficiency in decreasing ammonia by 82%. As with the OD process, in this FCR study showed that the denitrification process has not been successful.

Keywords: *efisiensi energi, food chain reactor, kawasan industri, kolam oksidasi, limbah organik*

Abstrak

Proses biologi-aerob merupakan teknologi yang sering dipilih untuk mengolah air limbah di kawasan industri, khususnya industri yang berkaitan dengan pangan. Dibandingkan dengan pengolahan secara kimia dan pengolahan teknologi lanjut, pengolahan secara biologi relatif lebih efisien dari segi biaya yang dibutuhkan. Walaupun demikian, pada pengolahan biologi konvensional memerlukan konsumsi energi yang besar sehingga menjadi salah satu tantangan. Tulisan ini mengkaji mengenai implementasi teknologi *Food Chain Reactor* (FCR) dalam mengolah air limbah kawasan industri, dengan berfokus pada tinjauan konsumsi energi dibandingkan dengan pengolahan biologi-aerob konvensional kolam oksidasi / *oxidation ditch* (OD). FCR merupakan instalasi pengolahan air limbah (IPAL) yang mengkombinasikan teknologi *Integrated Fixed Film Activated Sludge* (IFAS) dan teknologi yang menyerupai *Constructed Wetland*, sehingga memungkinkan terjadinya proses pengolahan secara fisika, biologi dan biokimia secara simultan didalam reaktor. Pada kajian studi kasus ini, implementasinya berhasil menunjukkan penurunan konsumsi energi sebesar 46.4 % dengan tetap mempertahankan efisiensi penurunan BOD sebesar 83% dan efisiensi penurunan amonia sebesar 82 %. Seperti pada proses OD, proses denitrifikasi pada teknologi FCR juga belum berhasil menunjukkan kinerja yang baik.

Kata Kunci: *efisiensi energi, food chain reactor, kawasan industri, kolam oksidasi, limbah organik*

1. Pendahuluan

Konservasi sumberdaya air semakin mendapat perhatian tinggi seiring semakin berkurangnya sumber air bersih secara global [1]. Untuk itu, teknologi pengolahan air limbah semakin dikembangkan untuk memberikan alternatif solusi yang semakin baik. Pada dasarnya teknologi pengolahan air limbah dapat dilakukan dengan prinsip fisika, kimia dan biologi, baik dalam tahapan pengolahan primer, sekunder, dan tersier [2]. Penentuan alternatif, jenis, dan teknologi pengolahan air limbah yang diimplementasikan disesuaikan dengan kualitas dan kuantitas air yang akan diolah, termasuk kelayakan ekonomi dan ketersediaan sumber daya. Ada beberapa jenis teknologi pengolahan air limbah secara oksidasi biologi aerobik yaitu antara lain proses lumpur aktif (*activated sludge process*), *aerated lagoon*,

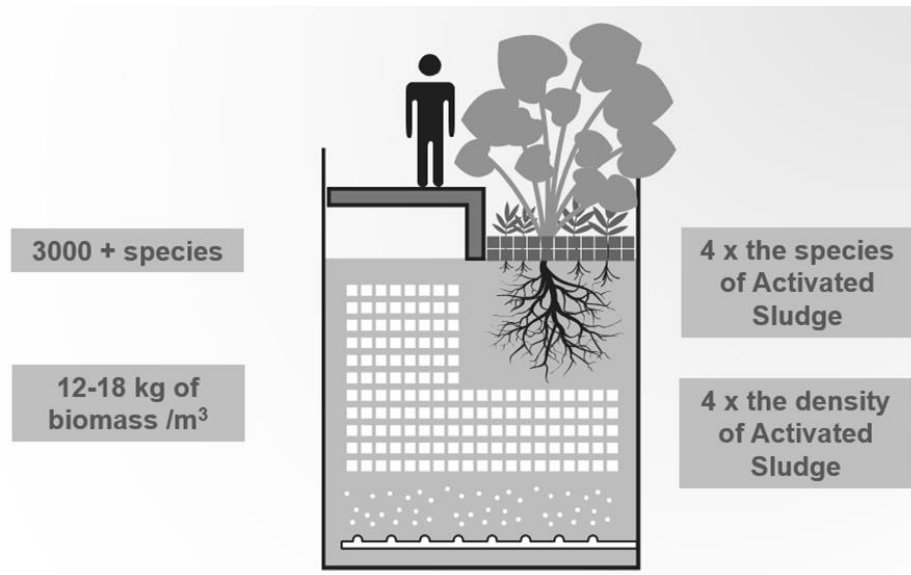
trickling filter, *rotating bio contactor*, dan kombinasi diantara sistem-sistem proses tersebut. Apabila ditinjau dari jenis media pertumbuhan mikroorganisme aerob yang dikembangkan, dapat digolongkan pada pertumbuhan tersuspensi (*suspended growth process*) dan yang melekat pada media (*attached growth process*) [2]. IFAS (*Integrated Fixed Film Activated Sludge*) yang dikembangkan dengan penggunaan media untuk memperluas permukaan sebagai tempat pertumbuhan mikroba. Pada umumnya pengolahan air limbah secara biologi aerob dipilih sebagai teknologi pengolahan air limbah dengan kadar polutan rendah sampai sedang. Teknologi ini secara umum dipakai dalam instalasi pengolahan air limbah terpadu (IPAL Terpadu) di kawasan industri di Indonesia dengan baku mutu nilai BOD air limbah dari perusahaan-perusahaan industri yang masuk kedalam IPAL terpadu kawasan industri sebesar 300 hingga 600 mg/l [3].

Teknologi MBBR (*Moving Bed Biofilm Reactor*) yaitu salah satu pengembangan dari sistem IFAS pada skala pilot menunjukkan hasil bahwa sistem MBBR mampu menurunkan beban senyawa organik hingga 3 kg TOC (*Total Organic Carbon*) per m³ per hari [4]. Selain itu juga menunjukkan kinerja nitrifikasi yang meningkat yang ditunjukkan dengan peningkatan AUR (*Ammonia Uptake Rate*) walaupun pada saat nilai SRT biomasa diturunkan. Penelitian mengenai kinerja start-up skala pilot teknologi IFAS dalam air limbah aktual menunjukkan bahwa pada saat konsentrasi biomasa (MLVSS) telah mencapai rentang 2000-3000 mg/L dengan umur lumpur (SRT = *Solid Retention Time*) 7 hari, diperoleh hasil penurunan BOD sebesar 77,3 % dan penurunan COD sebesar 70,9%. Dengan waktu tinggal hidrolis (HRT = *Hydraulic Retention Time*) sebesar 6,9 jam, serta laju alir resirkulasi lumpur aktif sebesar 160 % [5]. Selain itu, sistem IFAS ini juga menunjukkan hasil yang efektif dalam menurunkan beberapa bakteri patogen dengan kinerja berturut-turut sebagai berikut *Escherichia coli*, 79%; *Salmonella spp.*, 97,5%; *Shigella spp.*, 92,9%, *total coliforms*, 97,65%; *faecal coliforms*, 80,35% walaupun tanpa melalui proses desinfeksi [5]. Sedangkan Implementasi teknologi IFAS pada *proyek River of Life Project* (ROL) untuk memperbaiki kualitas air sungai menunjukkan hasil bahwa pada beban BOD yang rendah (10-30 mg BOD/L), dengan teknologi IFAS dapat dicapai efisiensi penurunan BOD yang baik meskipun dalam konsentrasi MLVSS yang rendah (0,2-50 mg/L) [6].

Proses pengolahan air limbah dengan oksidasi biologi aerobik perlu dikaji lebih mendalam karena biaya operasi dan pemeliharaannya relatif lebih rendah dari pada pengolahan secara kimia. Namun demikian teknologi proses ini mempunyai karakteristik membutuhkan pasokan energi yang relatif tinggi. Peningkatan efisiensi proses dan pengurangan biaya investasi dan biaya operasi sistem lumpur aktif dalam kolam oksidasi (*oxidation ditch / OD*) merupakan tantangan bagi ilmuwan dan lembaga yang berwenang. Penggunaan energi yang berlebihan dapat terjadi karena desain air limbah yang masuk (*inflow*) berbeda dengan aplikasi operasional oleh tingginya demografi musiman. Dari kajian perbandingan kinerja penggunaan energi pada proses IPAL, belum ditemukan satu parameter kunci yang dapat digunakan untuk melakukan karakterisasi kinerja energi secara universal [7]. Hal ini karena adanya perbedaan faktor pada ukuran IPAL, faktor pengenceran dan debit. Faktor lain yang berpengaruh juga adalah pemilihan jenis teknologi, tata letak, serta lokasi. Pada umumnya biaya penggunaan energi pada pengolahan air limbah dengan teknologi konservatif adalah sebesar 15 % - 40 % dari total biaya operasi [8]. Emisi karbon dari WWTP sangat tergantung pada bahan bakar pembangkit listrik, teknologi IPAL, kapasitas IPAL dan kualitas air limbah sebelum dan setelah proses IPAL [9].

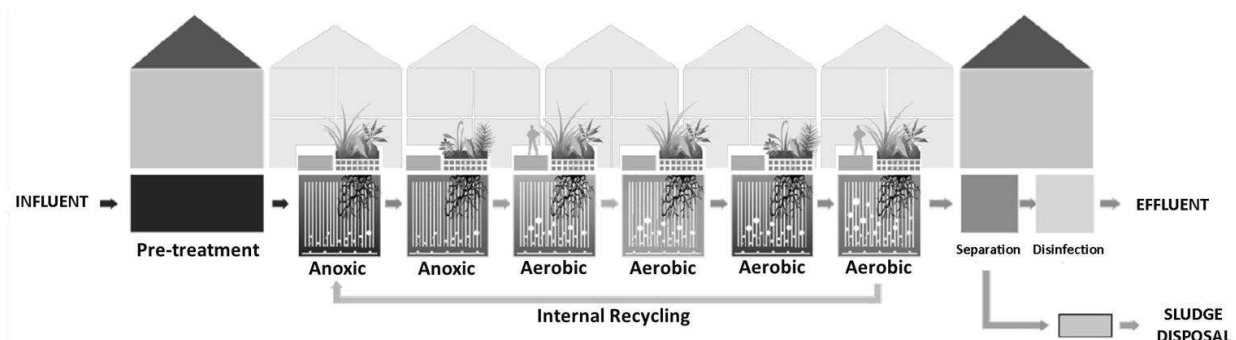
Beberapa penelitian mengenai perbandingan system IFAS dan OD baik skala pilot maupun skala penuh telah dilakukan. Teknologi IFAS dengan media plastik berhasil membuat kondisi reaktor aerobik mampu mempertahankan proses nitrifikasi sepanjang tahun, sedangkan sistem OD hanya mampu mereduksi karbon. Peningkatan proses IFAS juga meliputi *reactor anaerobic* dan *anoxic* sehingga meningkatkan reduksi Total nitrogen dan Fosfor [10]. Penelitian tentang teknologi *Fluidized Bed* pada reaktor OD dalam pengolahan air limbah domestik dengan kadar garam yang tinggi (0,5-1,5 %), dan hasilnya dibandingkan dengan kinerja sistem OD konvensional. Hasilnya menunjukkan penurunan COD yang lebih tinggi dalam rentang (48,5%-80%) dengan menggunakan teknologi *Fluidized Bed* dibandingkan dengan sistem OD konvensional dengan penurunan COD (26,5% – 62%) [11].

Teknologi FCR (*Food Chain Reactor*) pertama kali dikembangkan dengan menggunakan pendekatan ekologi modern yang diintegrasikan dengan sistem tradisional pada instalasi pengolahan air limbah domestik. Pengembangan instalasi yang pertama adalah pilot project di Denmark pada tahun 1984, sebagai proyek percontohan “*not allergic housing*” [1]. Selanjutnya dikembangkan teknologi FCR pada banyak IPAL di negara lain seperti di London, Israel, Amerika Utara, Saudi Arabia dan Yunani. Teknologi FCR yang dikembangkan ini merupakan kombinasi antara sistem tanaman alami dan IFAS. Penampang lintang teknologi FCR sesuai dengan **Gambar 1**.



Gambar 1. Penampang lintang Reaktor FCR [12]

Gambar 2 adalah ilustrasi 6 tahap pada proses FCR yang terdiri dari 2 tahap awal proses *anoxic* dan 4 tahap berikutnya *aerobic* dengan pengaturan kadar oksigen dan konsentrasi MLSS (*mixed liquor suspended solid*) pada masing-masing reaktor yang berbeda. Teknologi ekologi FCR-ORGANICA pertama kali diajukan di USA, sedangkan penelitian, pengembangan dan rekayasa teknologi dilakukan di Budapest Hongaria oleh Perusahaan yang berdiri tahun 1998 [1]. Teknologi FCR merupakan teknologi modern IPAL dengan manfaat ekologi, ekonomi maupun sosial yang lebih baik.

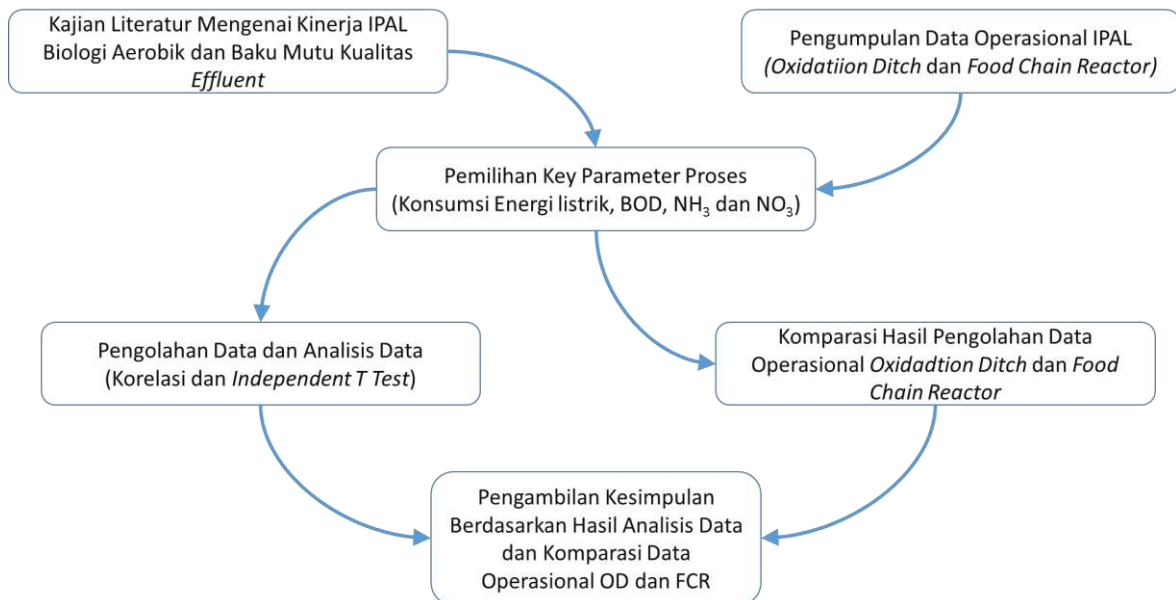


Gambar 2. Multi-tahap proses FCR [13]

Kelebihan FCR dapat mengurangi penggunaan energi, penurunan produksi lumpur Bahan Beracun Berbahaya (B3), serta perbaikan estetika IPAL sekaligus meningkatkan kualitas hasil proses dengan peningkatan penyisihan BOD, COD dan organik nitrogen [1]. Teknologi FCR dengan brand ORGANICA dikembangkan di Hongaria yang telah diimplementasikan sejak dan sesuai data tahun 2015 telah diaplikasikan pada 50 unit IPAL di Eropa maupun Asia Implementasi teknologi FCR tergolong masih baru dalam 5 tahun terakhir ini dibandingkan teknologi biologi aerobik konvensional CMAS (*Complete Mixed Activated Sludge*) yang telah lebih diimplementasikan selama 40 tahun terakhir [12], [13]. Tujuan penelitian ini adalah melakukan kajian reduksi konsumsi energi pada implementasi dua teknologi yang berbeda yaitu teknologi FCR dan OD dalam pengolahan air limbah kawasan industri terhadap kinerja efisiensi penurunan BOD, amonia, dan nitrat sebagai indikator keberhasilan oksidasi biologi, proses nitrifikasi dan denitrifikasi.

2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan di Instalasi Pengolahan air limbah (IPAL) industri Kawasan Industri Jababeka Kabupaten Bekasi, selama 6 bulan (November 2018 - Mei 2019). Data diambil dari data operasional dan data analisa harian laboratorium pada IPAL dengan teknologi OD selama dua bulan (Desember 2018-Januari 2019) yaitu 2 bulan saat teknologi OD masih diimplementasikan, dan dengan teknologi FCR selama 2 bulan (Februari – Maret 2019) yaitu 2 bulan pertama pada saat teknologi FCR diimplementasikan.



Gambar 3. Tahap pelaksanaan penelitian

Penelitian dimulai dengan kajian literatur mengenai parameter kinerja proses IPAL yang ditinjau dari parameter kunci indikator kinerja proses biologi aerobik maupun dibandingkan dengan standar kualitas sesuai dengan sasaran berdasarkan ketentuan yang berlaku. Dari tahap ini diambil 4 parameter selain data penggunaan energi listrik harian, yaitu analisa mingguan BOD, amonia (NH_3) dan nitrat (NO_3) pada air limbah sebelum dan sesudah proses IPAL. Data yang diambil berdasarkan hasil analisa Laboratorium PT Jababeka Infrastruktur yang telah mendapat sertifikat akreditasi dari KAN (Komite Akreditasi Nasional) dan ISO 17025. Parameter data yang diambil merupakan data aktual yang terjadi di operasional kinerja IPAL yang sesungguhnya. Dalam hal ini peneliti tidak melakukan intervensi pengaturan variabel proses IPAL dalam operasionalnya.

Setelah data sekunder dari implementasi operasional IPAL sistem OD maupun FCR terkumpul dengan lengkap, selanjutnya dilakukan pengolahan data yang dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Microsoft Excell* dengan memasukkan data-data dari proses air limbah yang sesuai pada teknologi OD dan FCR. Selanjutnya dengan *software R* dilakukan analisis korelasi dan signifikansi pada kedua pendekatan teknologi tersebut beserta kinerja proses IPAL-nya. Tahap proses pelaksanaan penelitian tercantum dalam **Gambar 3**.

3. Hasil dan Pembahasan

Pembatasan lingkup penelitian

Penelitian dilakukan selama 6 bulan dengan pengamatan dan pengambilan data efektif selama 4 bulan, yaitu 2 bulan terakhir pada saat IPAL masih menggunakan sistem proses OD dan pada 2 bulan pertama implementasi proses sistem FCR. Mengingat IPAL terpadu kawasan industri menampung dan mengolah air limbah dari lebih 100 perusahaan industri dari berbagai jenis industri seperti industri makanan dan minuman, otomotif, elektronik farmasi dan sebagainya, yang dapat terjadi fluktuasi kualitas air limbah yang masuk, maka dilakukan inventarisasi profile karakteristik kualitas air limbah yang masuk ke IPAL diolah selama 4 bulan tersebut sesuai dengan **Tabel 1** berdasarkan parameter baku air limbah sesuai dengan Tata Tertib Kawasan Industri Jababeka edisi tahun 2012 yang berlaku sampai kajian ini dilaksanakan [14].

Parameter yang dikaji dalam penelitian ini adalah perbandingan antara implementasi teknologi OD dan teknologi FCR pada parameter konsumsi energi, efisiensi penurunan BOD, amonia dan nitrat.

Pemilihan tersebut dengan pertimbangan ketiga tersebut parameter merupakan parameter kunci dalam desain pengolahan air limbah secara biologi aerobik [2]. BOD merupakan parameter keberhasilan dalam pengolahan air limbah senyawa organik [15]. Parameter BOD dan amonia termasuk parameter yang harus dipenuhi sesuai dengan Baku Mutu Air Limbah Kawasan Industri sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No 03 tahun 2010 [16]. Sedangkan nitrat (NO_3) merupakan salah satu parameter indikasi keberhasilan denitrifikasi dalam desain proses pengolahan air limbah secara aerobik biologi [2].

Tabel 1. Karakteristik air limbah kawasan industri yang masuk IPAL (*inflow*) [14]

No	Parameter	Satuan	Rata-rata	Minimum	Maksimum
1.	Debit Air Limbah	m^3/hari	5,211	4,075	6,495
2.	pH	-	6.74	6.48	6.96
3.	COD	mg/L	389.25	347.97	420.94
4.	BOD	mg/L	262.12	163.54	410.25
5.	TSS (Total Suspended Solids)	mg/L	209.96	171.33	256.75
6.	Amonia (NH_3 -N)	mg/L	31.49	24.58	39.57
7.	TKN (Total Kjeldahl Nitrogen)	mg/L	35.33	27.76	48.90
8.	Nitrit (NO_2)	mg/L	0.21	0.03	0.56
9.	Nitrat(NO_3)	mg/L	0.14	0.09	0.24
10.	Logam Berat (Cr+Cu+Pb+Ni+Zn)	mg/L	8.94	6.56	11.04
11.	Minyak dan Lemak	mg/L	3.67	1.78	7.40
12.	Sulfida	mg/L	0.43	0.36	0.57
13.	MBAS (Surfactant)	mg/L	1.02	0.67	1.99
14.	Phosphat	mg/L	2.11	0.35	6.17

Sumber: Data penelitian, 2019

Dokumentasi Pengamatan Fisik

Dokumentasi perbandingan fisik dan estetika antara sistem pengolahan air limbah OD dan FCR dapat dilihat pada Gambar 4. Pada Gambar tersebut dapat dilihat bahwa estetika dan kesehatan di lingkungan IPAL teknologi FCR lebih baik, karena pada OD ada paparan aerosol ke udara yang tinggi dari aerator pada permukaan air yang mengandung banyak mikroba, bau dan korosif. Hal ini berbeda dengan FCR dengan sistem aerasi difuser yang hampir tidak ada paparan aerosolnya, terlebih lagi adanya penutupan dengan tanaman [17]. Selain itu penampilan IPAL teknologi FCR yang menyerupai taman memungkinkan memberikan manfaat ekonomi, sosial dan ekologi yang lebih baik bagi masyarakat dan properti di sekitarnya [1].



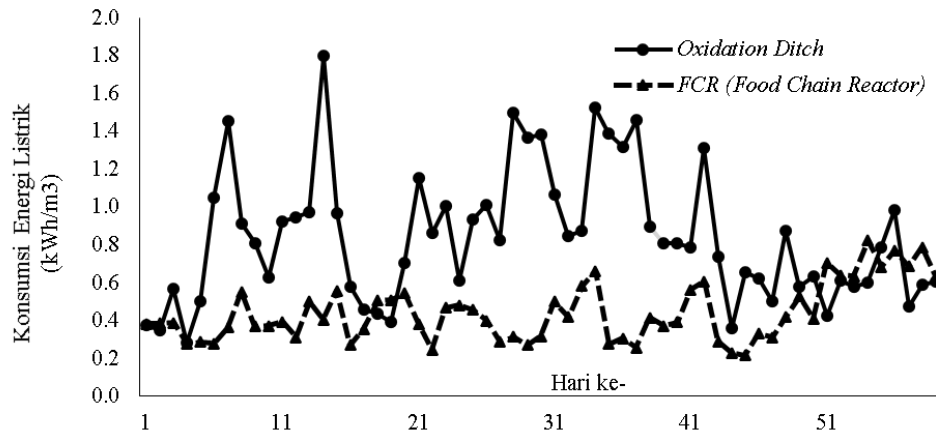
Gambar 4. (a) Penampilan IPAL sistem OD (2017); (b) dan FCR (2019)
Sumber : Dokumentasi Jababeka, 2019

Data Operasional

a. Perbandingan konsumsi energi

Dari data operasional implementasi selama 2 bulan terakhir (Desember 2018 - Januari 2019) pada proses pengolahan air limbah kawasan industri Jababeka yang masih menggunakan sistem OD dibandingkan dengan data implementasi selama 2 bulan pertama (Februari 2018 - Maret 2019) dengan sistem FCR dapat dilihat pada grafik pada **Gambar 5** untuk parameter konsumsi energi. Gambar 5 menunjukkan terjadi penurunan konsumsi energi sebesar sebesar 46.4% dari semula rata-rata 0,826 kWh/m³ menjadi 0.443 kWh/m³ pada 2 bulan pertama implementasi FCR.

Pengolahan data dengan *software R* dengan *interface R commander* pada pengujian sampel independen t dengan tingkat kepercayaan 95 % menghasilkan nilai p sebesar 4.703×10^{-12} atau lebih kecil dari 0,05. Hal ini membuktikan bahwa ada perbedaan signifikan penggunaan energi pada teknologi OD dan FCR.



Gambar 5. Grafik konsumsi energi pada teknologi OD dibandingkan FCR

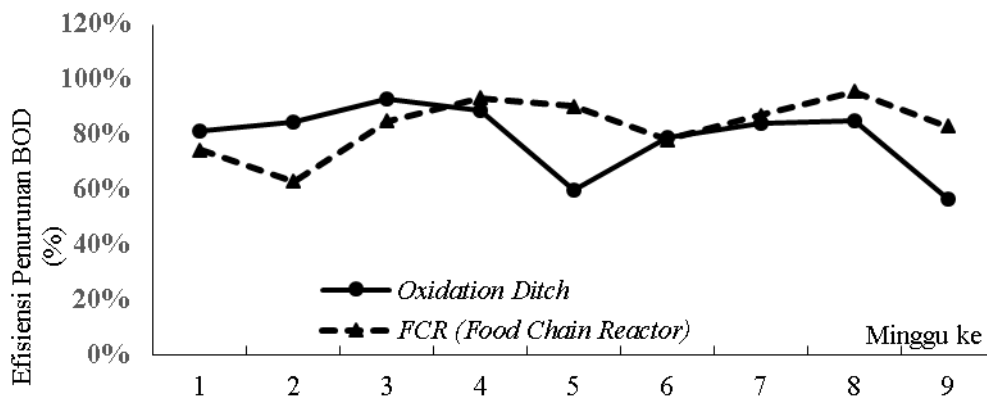
Selain itu, hasil perhitungan deviasi standar menggunakan *software microsoft excell* menunjukkan hasil sebesar 0,349 untuk teknologi OD dan sebesar 0,154 pada teknologi FCR. Lebih rendahnya nilai deviasi standar pada FCR menunjukkan penggunaan energi yang lebih stabil terhadap dinamika perubahan debit dan kualitas air limbah yang diproses. Penurunan penggunaan energi ini sejalan dengan penelitian pada beberapa IPAL di Eropa dan China yang menyatakan implementasi teknologi FCR menurunkan *footprint* sampai dengan 65%, termasuk didalamnya penurunan penggunaan energi dan pengurangan terbentuknya lumpur B3 [12]. Penurunan energi ini terutama disebabkan oleh:

- Perubahan sistem suplai oksigen yang semula menggunakan *mammoth rotor* yang tergolong aerator mekanik permukaan berkecepatan rendah (*low speed mechanical surface aerator*) menjadi sistem *diffuser*. Nilai SAE (*aeration efficiency*) aerator mekanik permukaan berkecepatan rendah berkisar antara 1,5 – 2.1 kg O₂ /kWh sedangkan *diffuser (fine-bubble diffusers with disc)* dapat mencapai sebesar 2 - 7 O₂ /kWh [2]. Dari berbagai data lapangan bahwa perubahan sistem aerasi dari aerator mekanik permukaan menjadi sistem aerasi *diffuser* dapat meningkatkan kapasitas proses IPAL, meningkatkan efisiensi energi, dan fleksibilitas operasional proses [17].
- Operasional teknologi FCR pada lumpur aktif dengan kadar MLSS yang tersuspensi lebih rendah memerlukan energi pengadukan yang lebih rendah dari pada teknologi OD dengan MLSS yang lebih tinggi yang berarti lebih kental. MLSS dan kekentalan (viskositas) mempunyai korelasi eksponensial, sedangkan penelitian sebelumnya menunjukkan korelasi yang linier yang diikuti korelasi eksponensial [18].
- Tidak adanya proses resirkulasi lumpur aktif sehingga mengurangi kebutuhan energi untuk pemompaan lumpur [12].

Namun penurunan penggunaan energi tersebut masih perlu ditingkatkan karena menurut salah satu penelitian yang dipublikasikan pada tahun 2009, yang melakukan analisis terhadap 1856 IPAL di China menunjukkan penggunaan energi rata-rata hanya sebesar 0.254 kWh/m³, dengan masih menggunakan teknologi konservatif yang umum diaplikasikan yaitu *oxidation ditch*, *anaerobic/Anoxic/Oxic* (A2O dan *Sequence Batch Reactor*) [19].

b. Perbandingan Efisiensi penurunan BOD

Grafik data perbandingan efisiensi BOD dapat dilihat pada **Gambar 6** dimana untuk teknologi OD rata-rata efisiensi sebesar 79 % dengan standar deviasi sebesar 0,125 sedangkan teknologi FCR sebesar 83 % dengan standar deviasi 0,102. Dari pengolahan data dengan software R pada tingkat kepercayaan 95 % memberikan hasil nilai $p = 0,415 > 0,05$ yang membuktikan tidak ada perbedaan efisiensi penurunan BOD pada teknologi OD dan FCR. Sedangkan dari nilai standar deviasi FCR yang lebih rendah menunjukkan stabilitas proses pengolahan teknologi FCR yang lebih baik.

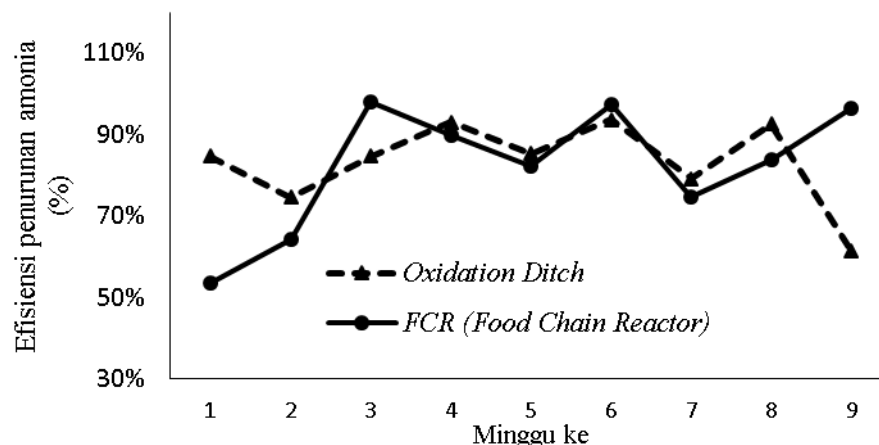


Gambar 6. Grafik efisiensi penurunan BOD pada teknologi OD dibandingkan FCR

Proses dalam teknologi FCR lebih stabil karena Sistem ekologi IPAL menghasilkan gabungan 2000-3000 spesies yang terdiri dari tanaman, hewan dan mikroba sehingga meningkatkan kemampuan proses, serta terdapat hewan “senior” seperti keong yang membantu proses pengolahan dapat menurunkan kelebihan lumpur aktif. Keanekaragaman sistem biologi yang lengkap dan stabil ini mendorong metabolisme proses kuat dan cepat [1].

c. Perbandingan Efisiensi penurunan amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$)

Grafik perbandingan data efisiensi penurunan amonia dapat dilihat pada **Gambar 7**. Untuk teknologi OD rata-rata efisiensi sebesar 83 % dengan standar deviasi sebesar 0,104 sedangkan teknologi FCR sebesar 82 % dengan standar deviasi 0,156. Ini menunjukkan bahwa pada FCR efisiensi penurunan ammonia kurang stabil dibandingkan pada OD. Dari pengolahan data dengan software R pada tingkat kepercayaan 95 % memberikan hasil nilai $p = 0,873 > 0,05$ yang berarti membuktikan tidak ada perbedaan efisiensi penurunan amonia pada teknologi OD dan FCR.



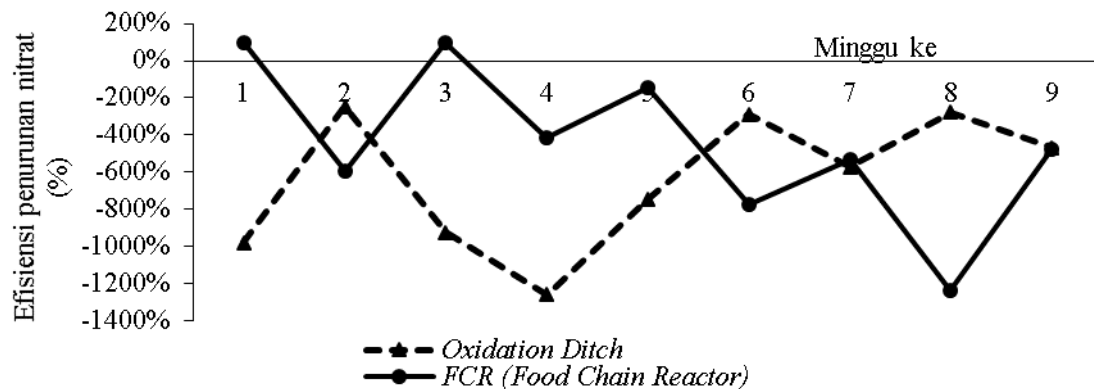
Gambar 7. Grafik efisiensi penurunan amonia pada teknologi OD dibandingkan FCR

Data ini menunjukkan bahwa dengan penghematan penggunaan energi sebesar 46,4 %, tetap ada keberhasilan proses FCR dalam nitrifikasi yang ditunjukkan dengan efisiensi proses penurunan amonia yang baik sebagaimana pada teknologi OD. Keberhasilan proses nitrifikasi berbanding lurus dengan penurunan konsentrasi amonia dalam air limbah [2]. Kondisi ini sejalan dengan implementasi FCR pada IPAL domestik perkotaan di Shenzhen China [1]. Sedangkan kurang stabilnya efisiensi penurunan ammonia pada FCR dibandingkan dengan teknologi OD kemungkinan karena masih belum stabilnya populasi mikroba yang berperan dalam perubahan proses nitrifikasi : tahap 1 : $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$ oleh

mikroba nitroso (*Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrosospira*, *Nitrosolobus*, and *Nitrososporobrio*) yang dilanjutkan dengan tahap 2 : $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ oleh mikroba nitro (*Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira*, *Nitrospina*, and *Nitroeystis*). Hal ini karena pada implementasi di kawasan industri Jababeka terdapat polutan lain yang lebih berat dibandingkan air limbah domestik, yaitu terdapat logam berat serta pH lebih rendah yang dapat menjadi inhibitor dalam proses nitrifikasi [1].

d. Perbandingan efisiensi penurunan nitrat (NO_3)

Dari **Gambar 8** dapat dilihat terdapat nilai efisiensi negatif, baik pada teknologi OD maupun FCR. Pada teknologi OD efisiensi penurunan nitrat sebesar -640 % atau berarti kadar nitrat meningkat 640 % sedangkan pada FCR meningkat sebesar 440 %.



Gambar 8. Grafik efisiensi penurunan nitrat pada teknologi OD dibandingkan FCR

Hal ini menunjukkan konsentrasi nitrat setelah proses pengolahan pada kedua teknologi tersebut mengalami kenaikan dibandingkan dengan kualitas air limbah awal. Peningkatan konsentrasi nitrat ini menunjukkan belum berhasilnya proses denitrifikasi, yaitu belum berhasilnya reaksi perubahan nitrat dari hasil nitrifikasi menjadi N_2 sesuai reaksi : $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2$, baik pada teknologi OD maupun FCR.

Dari pengolahan data dengan software R pada tingkat kepercayaan 95 % memberikan hasil nilai $p = 0,2995 > 0,05$ yang berarti membuktikan tidak ada perbedaan efisiensi penurunan nitrat pada teknologi OD dan FCR. Tidak seperti proses nitrifikasi yang dapat berlangsung mudah asalkan terdapat jumlah dan jenis mikroba yang cukup disertai konsentrasi oksigen yang memadai, proses denitrifikasi lebih sulit terjadi karena harus dipenuhi syarat lain seperti tingkat keasaman yang optimal, dan adanya donor hidrogen dengan mikroba autotrof maupun heterotrof yang sesuai seperti *Achromohaciet*, *Arinetobacter*, *Agrobacterium*, *Alcaiiigenes*, *Arthrobacfer*, *Bacillus*, *Chromobacterium* dan *Corynebacterium* [2]. Selain denitrifikasi biologi, proses penghilangan nitrat antara lain dapat dilakukan dengan teknologi reverse osmosis, elektrodialisa, penukar ion, dan denitrifikasi kimia maupun adsorpsi [20].

4. Kesimpulan

Implementasi teknologi FCR terbukti secara signifikan dapat menurunkan konsumsi energi IPAL sebesar 46,4 % dibandingkan dengan teknologi *Oxidation Ditch* (OD) dari semula rata-rata $0,826 \text{ kWh/m}^3$ menjadi $0,443 \text{ kWh/m}^3$. Pada implementasi teknologi FCR tersebut juga menunjukkan kinerja efisiensi penurunan BOD yang tetap baik yaitu dari sebesar 79% pada teknologi OD menjadi sebesar 83% pada teknologi FCR. Demikian pula untuk kinerja nitrifikasi dan denitrifikasi tidak terjadi perubahan yang signifikan, yaitu efisiensi penurunan amonia dari semula sebesar 82% pada teknologi OD menjadi sebesar 83% pada teknologi FCR. Sedangkan untuk parameter nitrat terjadi peningkatan sebesar masing-masing sebesar 640% dan 440% untuk teknologi OD dan FCR. Dengan demikian hasil kajian ini menunjukkan dengan implementasi teknologi FCR dapat secara signifikan menurunkan kebutuhan energi operasional proses IPAL dengan tetap mempertahankan kinerja penurunan BOD, ammonia dan nitrat.

5. Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada Management dan seluruh staf PT Jababeka Infrastruktur, terutama Susilo Tri Harsono (Manager IPAL), Ir. Rachmat Yulianto, M.M., (Senior Manager Desain dan Perencanaan), serta Ir. Istingani, M.Si. (Senior Manager Pengolahan Air dan Lingkungan) yang telah bersedia memberikan dukungan data operasional dan data laboratorium, serta mengijinkan publikasi data pada penelitian ini.

6. Referensi

- [1] Q. Yuje, W. Jiandong, and O. Hai, "The Application of Organica Ecological Technology in Residential Sewage Treatment," *J. Environ. Prot. (Irvine,. Calif.)*, vol. 04, no. 01, pp. 31–34, 2013.
- [2] G. Tchobanoglous, F. L. Burton, and H. D. Stensel, *Wastewater engineering : treatment and resource recovery*, 5th ed. New York : McGraw-Hill Higher Education ; London : McGraw-Hill, 2014.
- [3] T. Wikaningrum, "Kebijakan Pengelolaan Lingkungan Kawasan Industri Sesuai Proper Kllhk Peringkat Hijau (Studi Kasus Di Kawasan Industri Jababeka Bekasi)," *J. Nat. Resour. Environ. Manag.*, vol. 5, no. 2, pp. 111–120, 2015.
- [4] D. Di Trapani, M. Christensson, M. Torregrossa, G. Viviani, and H. Ødegaard, "Performance of a hybrid activated sludge/biofilm process for wastewater treatment in a cold climate region: Influence of operating conditions," *Biochem. Eng. J.*, vol. 77, pp. 214–219, 2013.
- [5] N. K. Singh, A. A. Kazmi, and M. Starkl, "Environmental performance of an integrated fixed-film activated sludge (IFAS) reactor treating actual municipal wastewater during start-up phase," *Water Sci. Technol.*, vol. 72, no. 10, pp. 1840–1850, 2015.
- [6] H. A. Mohiyaden, L. M. Sidek, and G. Hayder, "The performance of attached and suspended growth process in integrated fixed activated sludge," *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 1751–1763, 2019.
- [7] M. D'Antoni and S. Longo, "Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement," *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 1251–1268, 2016.
- [8] J. R. S. Scolforo, É. Vilela de Resende Von Pinho, A. Chalfun-Junior, A. Higino Freire, L. Coelho Naves, and M. Machado Ladeira, "How the environmental planning of the Universidade Federal de Lavras impacts higher education," *E3S Web Conf.*, vol. 48, p. 06004, 2018.
- [9] H. Wang *et al.*, "Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa," *Appl. Energy*, vol. 184, pp. 873–881, 2016.
- [10] K. Rutt, J. Seda, and C. H. Johnson, "Two Year Case Study of Integrated Fixed Film Activated Sludge (IFAS) at Broomfield, CO WWTP," *Proc. Water Environ. Fed.*, vol. 2006, no. 13, pp. 225–239, 2014.
- [11] N. Salmanikhas, M. Tizghadam, and A. Rashidi Mehrabadi, "Treatment of saline municipal wastewater using hybrid growth system," *J. Biol. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–10, 2016.
- [12] J. Koumoukelis, "COMBINING THE USE OF ENGINEERED AND NATURAL PLANTS IN ACTIVATED SLUDGE," in *9th Annual WIOA NSW Water Industry Operations Conference and Exhibition*, 2015, pp. 116–121.
- [13] L. Probst, L. Frideres, D. Demetri, and B. Pedersen, "Clean Technologies Advanced reverse treatment technologies Business Innovation Observatory," 2014.
- [14] PT Jababeka, "Industrial Estate Regulations." PT Jababeka, Cikarang, pp. 1–39, 2012.
- [15] Dirjen Industri Kecil Menengah Departemen Perindustrian, "Pengelolaan Limbah Industri Pangan," Jakarta, 2007.
- [16] Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 03 Tahun 2010 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Kawasan Industri." Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, Indonesia, pp. 1–7, 2010.
- [17] M. Gehring and J. Lindam, "Energy-Efficiency Showdown: A Comparison Of Aeration Technologies," pp. 1–4, 2013.
- [18] H. Azami, M. H. Sarrafzadeh, and M. R. Mehrnia, "Influence of sludge rheological properties on the membrane fouling in submerged membrane bioreactor," *Desalin. Water Treat.*, vol. 34, no. 1–3, pp. 117–122, Oct. 2011.
- [19] X. Tao and W. Chengwen, "Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants in China," in *World Congress on Water, Climate and Energy*, 2012, no. May, pp. 1–6.
- [20] M. Mohsenipour, S. Shahid, and K. Ebrahimi, "Removal techniques of nitrate from water," *Asian J. Chem.*, vol. 26, no. 23, pp. 7881–7886, 2014.