

Penyisihan Material Organik dan Nitrogen dengan Proses Aerasi Menggunakan *Microbubble Generator* (MBG) pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Asrama

Hafasatya Maharani Putri¹, Sri Puji Saraswati^{1,2}, Johan Syafri Mahathir²

¹Magister Teknik Sistem, Universitas Gadjah Mada, Jalan Teknik Utara No.3 Kabupaten Sleman, Yogyakarta 55281 Indonesia

²Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada Jalan Grafika Kampus No.2 Kabupaten Sleman, Yogyakarta 55284 Indonesia

ABSTRAK

Sebuah Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di asrama mahasiswi UGM, Yogyakarta memiliki unit reaktor yang terdiri dari ekualisasi, aerasi 1, aerasi 2 dan *clarifier* dengan proses aerasi secara intermiten menggunakan *Microbubble Generator* (MBG) dengan fase aerasi dan tanpa aerasi masing-masing selama 15 menit. IPAL tersebut dibangun sebagai upaya dalam memenuhi standar *Green Building* bagi bangunan lama asrama di UGM untuk mengolah air limbah *grey water*. Hasil olahan air limbah akan dimanfaatkan di lingkungan asrama. Selama 208 hari beroperasi, kajian mengenai performa IPAL belum pernah dilakukan. Oleh karena itu, diperlukan kajian untuk mengetahui performa dan konsumsi energi pada IPAL dalam menyisihkan parameter pencemar berupa COD, nitrogen dan fosfat. Kajian dilakukan selama 81 hari pengamatan dengan menguji parameter kualitas air limbah pada setiap unit pengolahan. Parameter COD dan amonia telah memenuhi baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 68 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik, sedangkan parameter fosfat masih belum memenuhi baku mutu Peraturan Daerah D.I.Y. No.7 Tahun 2016 mengenai kegiatan IPAL Komunal. Hasil pengamatan pada performa IPAL, menunjukkan kedua tangki aerasi memiliki performa yang hampir sama, namun keberadaan tangki aerasi 2 tidak memiliki pengaruh yang signifikan dalam menyisihkan parameter pencemar. Pada tangki aerasi 1, efisiensi penyisihan COD mencapai rata-rata sebesar 73,6±17,46%, penyisihan PO₄-P sebesar 39,12±14,96%, penyisihan total nitrogen sebesar 56,15±19,6%, efisiensi nitrifikasi sebesar 73,1±20,07% dan efisiensi denitrifikasi sebesar 61,72±27,48%. Total konsumsi energi pada IPAL dengan proses aerasi intermiten, dengan debit rerata 537,84 l/hari sebesar 14,12 kWh/m³ dan biaya sebesar Rp. 20.414/m³. Urutan konsumsi energi terbesar adalah penyisihan fosfat sebesar 5,10 kWh/gPO₄-P, kemudian penyisihan amonia sebesar 1,79 kWh/gNH₃-N, penyisihan TN sebesar 1,95 kWh/gTN dan penyisihan COD sebesar 0,45 kWh/gCOD.

Kata kunci: *grey water*, *microbubble generator*, aerasi intermiten, *green building*, konsumsi energi

ABSTRACT

A Wastewater Treatment Plant (WWTP) in the student dormitory of UGM, Yogyakarta has a reactor unit consists of an equalization, aeration 1, aeration 2, and clarifier with intermittent aeration process using a Microbubble Generator (MBG) with or without aeration for 15 minutes each. The WWTP was built as an effort to meet the Green Building standards for the old dormitory at UGM to make better process of grey water. The processed wastewater will be used for the dormitory environment. Operated for 208 days, there was no former studies for the WWTP. Therefore, a study is needed to determine performance and energy consumption of the WWTP in removing pollutant parameters consisting of COD, nitrogen and phosphate. The study was carried out for 81 days of observation by testing the wastewater quality parameters in each treatment unit. COD and ammonia parameters have met the quality standards of the Regulation of the Minister of Environment and Forestry No. 68 of 2016 concerning Domestic Wastewater Quality Standards, while phosphate doesn't meet the quality standards of Regional Regulation D.I.Y. No. 7 of 2016 concerning Communal WWTP Activities. Results shows the performance from two aeration tanks are almost the same, but the existence of aeration tank 2 doesn't have a significant effect. The results in aeration tank 1 showed the COD removal efficiency reached an average of 73.6±17.46%, PO₄-P removal 39.12±14.96%, total nitrogen removal 56.15±19.6%, the nitrification efficiency 73.1±20.07% the denitrification efficiency 61.72±27.48%. The total energy consumption with intermittent aeration process with an average discharge of 537.84 l/day is 14.12 kWh/m³ and a cost of Rp. 20,414/m³ with the largest energy use being phosphate removal at 5.10 kWh/gPO₄-P, then ammonia removal at 1.79 kWh/gNH₃-N, TN removal at 1.95 kWh/gTN and COD removal at 0.45 kWh/gCOD.

Keywords: grey water, microbubble generator, intermittent aeration, green building, energy consumption

Sitasi: Putri, H.M., Saraswati, S.P., dan Mahathir, J.S. (2022). Penyisihan Material Organik dan Nitrogen dengan Proses Aerasi Menggunakan Microbubble Generator (MBG) pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Asrama. Jurnal Ilmu Lingkungan, 20(1), 127-138, <https://doi.org/10.14710/jil.20.1.127-138>

¹ Penulis korespondensi: hafasatyamaharani@mail.ugm.ac.id

1. Pendahuluan

Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Bulaksumur *Residence* (BR) dibangun pada Januari tahun 2020 dan dikelola oleh UGM *Residence* yang merupakan pihak pengelola seluruh unit asrama di UGM. Unit pengolahan pada IPAL BR meliputi sistem *activated sludge* dan *on-off aeration* dengan jenis aerator yang digunakan berupa *Microbubble Generator* (MBG). Unit pengolahan air limbah pada IPAL BR ditujukan untuk mengolah limbah *grey water* yang merupakan limbah non-kakus yang berasal dari kegiatan mandi, cuci, dan dapur pada blok utara, Gedung Merapi, Bulaksumur *Residence*. Kelebihan utama penerapan strategi aerasi *intermittent* dalam pengolahan air limbah diantaranya penyisihan nitrogen yang cukup tinggi, mengurangi biaya operasional karena berkurangnya pasokan oksigen dan mengurangi jumlah sumber daya karbon yang dibutuhkan untuk denitrifikasi (Gürtekin, 2019). *Microbubble Generator* (MBG) merupakan alat aerasi yang menghasilkan gelembung udara mikro dengan ukuran diameter 10 – 50 μm (Liu et al., 2012). Gelembung udara yang sangat kecil pada MBG akan menyebabkan luas transfer oksigen sangat besar dan kecepatan gelembung naik ke permukaan reaktor relatif lebih rendah dibandingkan dengan aerator dengan gelembung udara makro. Hal ini membuat MBG mampu menyuplai oksigen dengan efisien yang tinggi (Octy et al., 2015). Gelembung udara yang diinjeksikan oleh MBG akan terlarut dalam air dan oksigen relatif mempunyai waktu tinggal yang lama dalam fase cair (Terasaka et al., 2011).

IPAL Bulaksumur *Residence* dirancang dengan kapasitas pengolahan sebesar 8,06 m^3/hari . Alur pengolahan air limbah pada IPAL Bulaksumur *Residence* dimulai dengan unit ekualisasi yang berfungsi untuk menghomogenkan debit air limbah yang akan diolah dan mengalir menuju unit aerasi pada Tangki Aerasi 1 dan Aerasi 2 dengan menggunakan alat aerator berupa MBG. Air limbah pada Tangki Aerasi 1 akan masuk ke Tangki Aerasi 2, sistem aerasi pada IPAL memiliki 2 fase yang berjalan secara seri dan paralel yang bertujuan untuk menambah efektifitas proses pengolahan. Kedua tangki aerasi ini memiliki pompa aerasi, yang sekaligus menjadi pompa sirkulasi air limbah yang berasal dari tangki *clarifier*. Pada saat efluen diresirkulasi, kandungan oksigen dalam air limbah akan meningkat dan akan menyebabkan peningkatan interaksi polutan pencemar dengan mikroorganisme. Resirkulasi memiliki peran yang penting pada proses pengolahan air limbah secara biologis karena dapat mempengaruhi konsentrasi polutan khususnya nutrien (Karches, 2018).

Fase aerasi dan tanpa aerasi (*on-off aeration*) pada IPAL berjalan secara kontinyu selama masing-masing

15 menit. Keberadaan Tangki Aerasi 2 bertujuan untuk membantu proses aerasi pada IPAL dapat berjalan dengan baik ketika debit air limbah cukup tinggi. Selanjutnya *grey water* dialirkan menuju unit *clarifier* dan akan dipompa menuju tangki penampungan hasil pengolahan air limbah yang akan digunakan untuk menyiram tanaman dan lingkungan di sekitar asrama Bulaksumur *Residence*, sedangkan air limpasan (*over flow*) dari unit *clarifier* dialirkan ke saluran drainase yang menuju ke Kali Belik.

Grey water memiliki karakteristik yang bervariasi. Pada kegiatan dapur, *grey water* kaya akan padatan tersuspensi dan senyawa nitrogen (Ajit, 2016). Sedangkan *grey water* yang berasal dari *floor drain* kamar mandi dan kegiatan mencuci lebih banyak mengandung *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan fosfor (Suharto, 2011). COD merupakan salah satu parameter pencemar kualitas air limbah yang sangat penting dalam karakterisasi kualitas air limbah untuk menentukan beban organik di dalam air (Kolb et al., 2017). Selain menghilangkan beban pencemar organik dan padatan yang tersuspensi pada air limbah, penghilangan kandungan nutrien pun perlu dilakukan untuk mencegah pencemaran lingkungan terutama pada daerah yang sensitif akan nutrien. Terdapat beberapa metode pengolahan biologis untuk menyisihkan kandungan nutrien dan COD di dalam air limbah secara optimal, diantaranya adalah dengan pengolahan secara aerobik (aerasi) (Zhao et al., 2020). Salah satu teknologi yang tepat dalam menyisihkan kandungan nitrogen dan fosfor yang memiliki nilai ekonomis adalah dengan pengolahan biologis menggunakan sistem lumpur aktif yang dilengkapi dengan proses aerasi intermitten (Derco et al., 2017).

Pengoperasian IPAL yang baik dapat menunjukkan kinerja yang baik dalam hal efektivitas dan kehandalan operasional (Cassidy et al., 2020). Selain meningkatkan efektivitas kinerja instalasi pengolahan, tata cara dan standar pembuangan limbah cair juga perlu diperhatikan, salah satunya adalah IPAL dapat menghasilkan efluen yang memenuhi baku mutu untuk kandungan nutrien meliputi fosfat dan total nitrogen dan kandungan material organik berupa COD.

Evaluasi kinerja IPAL Bulaksumur *Residence* terhadap parameter pencemar kualitas air limbah belum pernah dilakukan sebelumnya sejak pembangunan IPAL selesai dibangun dan IPAL mulai dioperasikan. Oleh karena itu, studi terkait kinerja IPAL Bulaksumur *Residence* penting dilakukan. Selain kinerja pengolahan, kehandalan operasional pada IPAL juga perlu dianalisa mengingat minimnya informasi yang tersedia terkait kehandalan operasional dari berbagai macam teknologi IPAL komunal yang ada. Kehandalan operasional meliputi efektifitas kinerja IPAL dan energi yang dibutuhkan IPAL dalam menyisihkan material

organik dan nutrisi untuk mengetahui keterjangkauan harga dalam operasional IPAL dalam mencapai manfaat lingkungan dari IPAL yang terbangun. Penelitian yang dilakukan dapat memberikan informasi *pilot project* IPAL komunal terkait efektifitas operasional meliputi kualitas efluen pada proses pengolahan air limbah dengan *aeration intermittent* menggunakan *microbubble generator* yang cukup sederhana dan dapat diaplikasikan di lingkungan masyarakat serta kebutuhan energi pada IPAL dalam menyisihkan kontaminan. Tujuan penelitian ini diantaranya untuk mengetahui kinerja penyisihan kandungan COD, fosfat, total nitrogen, dan efisiensi nitrifikasi - denitrifikasi, serta mengetahui total konsumsi energi dan biaya operasional yang dibutuhkan untuk menyisihkan kontaminan dengan sistem aerasi intermiten menggunakan MBG.

2. Metodologi

2.1 Proses Pengolahan IPAL

IPAL BR mengolah air buangan yang berasal dari *floor drain* yakni *grey water* yang berasal dari kamar mandi, mushola dan dapur dari blok utara asrama Bulaksumur. Hasil olahan air limbah dari IPAL BR akan ditampung dan dimanfaatkan sebagai air untuk menyiram tanaman di lingkungan asrama. Proses pengolahan air limbah pada IPAL BR terdiri dari 5 unit tangki pengolahan antara lain tangki ekualisasi, tangki aerasi 1, tangki aerasi 2, tangki *clarifier* dan tangki penampungan. Diagram alir IPAL BR disajikan pada Gambar 1.

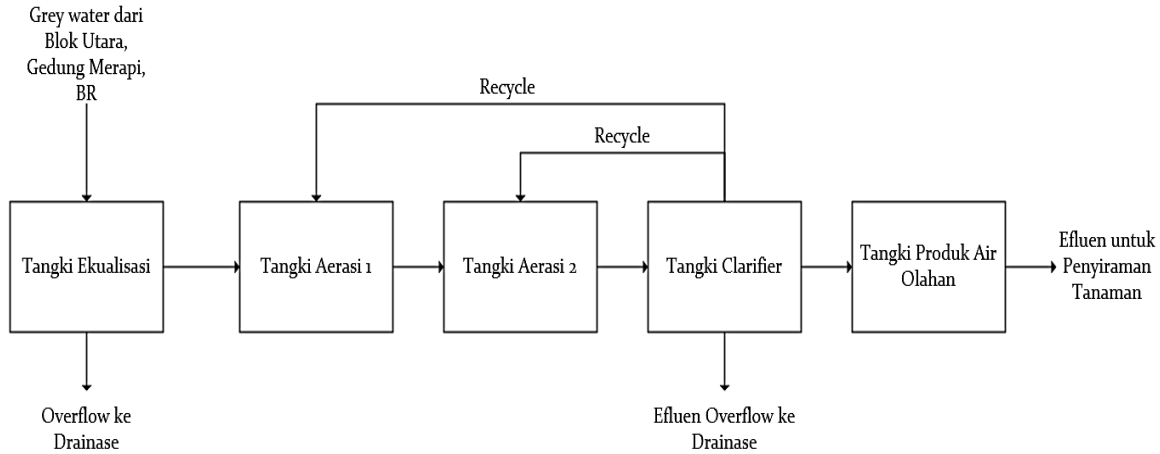
Air limbah *grey water* yang berasal dari *floor drain* dialirkan menuju tangki ekualisasi yang berfungsi untuk menampung air limbah dan menghomogenkan debit dan aliran yang akan masuk ke tangki aerasi. Tangki ini dilengkapi pompa rendam air kotor yang secara otomatis akan memompa air limbah ke Tangki Aerasi 1 saat tangki ekualisasi terisi 80% atau ketinggian air mencapai ± 82 cm selain itu terdapat filter yang terbungkus di ujung pipa untuk menyaring rambut dan serat-serat lainnya yang bisa mengganggu kinerja pompa rendam air kotor. Jika *grey water* yang masuk ke tangki ekualisasi memiliki debit yang sangat besar atau terjadi *overflow* maka *grey water* akan dialirkan ke selokan.

Selanjutnya *grey water* akan masuk ke tangki aerasi 1 dan tangki aerasi 2, yaitu pengolahan biologis secara biologis secara aerasi dengan *supply* oksigen menggunakan *Microbubble Generator* (MBG). Sistem aerasi MBG memiliki 2 fase yaitu fase aerasi dan tanpa

aerasi yang berlangsung secara intermiten yaitu *on-aeration* 15 menit dan tanpa aerasi tau *off-aeration* selama 15 menit. Proses aerasi secara intermiten bertujuan untuk menciptakan suasana pengolahan yang mendukung terjadinya proses nitrifikasi dan denitrifikasi secara bersamaan dan mencapai biaya dan energi yang dibutuhkan lebih rendah (Uggetti et al., 2016). Tangki aerasi 1 dan aerasi 2 dilengkapi dengan pompa sentrifugal sebagai pompa resirkulasi *grey water* yang berasal dari tangki *clarifier* yang merupakan tangki pengendapan dimana terjadi proses pemisahan air terhadap zat yang terlarut dalam air. Resirkulasi memiliki peran yang penting pada proses pengolahan air limbah secara biologis karena dapat mempengaruhi konsentrasi polutan khususnya nutrisi (Karches, 2018). Resirkulasi efluen secara signifikan dapat meningkatkan efisiensi dan tingkat penyisihan nitrogen total (Torrijos et al., 2016). Debit resirkulasi pada Tangki Aerasi 1 sebesar 500 liter/jam dan Tangki Aerasi 2 sebesar 650 liter/jam yang dapat diketahui pada rotameter yang terpasang di IPAL. Tangki *clarifier* dilengkapi pompa dengan saklar otomatis yang akan memompa *grey water* ke tangki penampungan air hasil olahan jika ketinggian di tangki *clarifier* sudah tinggi. Tangki penampungan berada di lantai 4 gedung asrama yang berfungsi untuk menampung *grey water* yang sudah diolah dan akan digunakan sebagai air untuk menyiram tanaman di lingkungan asrama. Tangki ini dilengkapi pompa dengan saklar otomatis yang akan mengambil air dari tangki *clarifier* jika volume di tangki penampungan hanya terisi $\pm 20\%$ dan volume di tangki *clarifier* memiliki jumlah yang cukup untuk mengisi tangki penampungan. Pengambilan sampel air limbah dilakukan pada 4 titik yakni titik 1 pada inlet, titik 2 pada outlet Tangki Aerasi 1, titik 3 pada outlet Tangki Aerasi 2 dan titik 4 pada outlet Tangki *Clarifier*.

2.2 Metode Sampling

Pengambilan sampel uji air limbah dilakukan 2 kali dalam 1 minggu pada Hari Minggu dan Kamis mulai dari 4 Oktober 2020 s/d 24 Desember 2020 dengan rentang waktu 07.00 - 08.00 WIB. Penelitian dilakukan setelah IPAL sudah beroperasi sekitar 208 hari dan pengamatan dilakukan selama 81 hari. Prosedur pengambilan dan penyimpanan sampel uji kualitas air limbah sesuai dengan standar EPA dan SNI 6989.57:2008 dengan parameter kualitas air limbah yang diuji adalah *Chemical Oxygen Demand* (COD), nitrit ($\text{NO}_2\text{-N}$), nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$) dan amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$).



Gambar 1 Diagram Alir IPAL

Tabel 1 Metode Pengukuran On Site

No	Parameter	Titik Sampling	Metode Pengukuran	Alat Ukur
1	Debit	Tangki Aerasi 1	Membaca perubahan volume pada flow meter	Flow meter (m ³)
2.	Dissolved Oxygen (DO)	Tangki Ekualisasi, Tangki Aerasi 1 & Aerasi 2, Tangki Clarifier	Mengukur kadar DO pada 4 titik sampling	Portable Dissolved Hanna HI - 98193 (O ₂ /l)
3.	Energi (kWh)	Pompa Inlet (Ekualisasi), Pompa MBG (Aerasi 1&2), Pompa 4 submersible	Pencatatan kWh meter dilakukan pada saat sampling air limbah	kWh meter (kWh)

Tabel 2 Metode Analisis Laboratorium

No	Parameter	Reagen	Metode Uji	Alat
1	Chemical Oxygen Demand (COD)	Larutan baku: K ₂ Cr ₂ O ₇ 0,1 N	SNI 6989:2:2009 metode rekflus dengan Spektrofotometri	COD Thermoreactor HB-1 Wealtec, USA
2	Amonia (NH ₃ -N)	Amonia ISA (HACH, Germany Cat.4447169-ID)	HACH DR2010 manual book dengan Spektrofotometri	HQ40D Portable Meter
3	Fosfat (PO ₄ -P)	Molybdvanadate (HACH, Germany Cat. 2076032-ID)		Spektrofotometer HACH DR 2010
4	Nitrit (NO ₂ -N)	NitriVer 3 reagent powder pillows (HACH, Germany Cat. 2107169-ID)		Spektrofotometer HACH DR 2010
5	Nitrat (NO ₃ -N)	NitraVer 5 Nitrate (HACH, Germany) Cat. 2106169-ID		Spektrofotometer HACH DR 2010

2.3 Pengukuran Langsung (On-Site)

Metode analisis kualitas air pada IPAL BR dilakukan dengan pengukuran langsung di lapangan (*on-site*) dengan rincian yang tersaji pada Tabel 1.

2.4 Analisis Laboratorium

Peraturan yang digunakan sebagai pembandingan standar baku mutu efluen dalam penelitian ini adalah Peraturan Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta Nomor 7 Tahun 2016 Tentang Baku Mutu Air Limbah dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan

Kehutanan Nomor 68 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik. Uji parameter kualitas air limbah pada laboratorium dilakukan sesuai dengan metode yang tersaji pada Tabel 2.

2.5 Metode Perhitungan

Independent T-Test merupakan uji komparatif yang digunakan untuk mengetahui perbedaan rerata antara 2 kelompok bebas atau tidak berpasangan untuk mengetahui *P value* dengan nilai jika *P value* < 0,05 menunjukkan pengaruh yang signifikan dan

menunjukkan adanya perbedaan rata-rata antar subjek penelitian. Sedangkan $Pvalue > 0,05$ berarti tidak ada pengaruh yang signifikan. Menunjukkan tidak terdapat perbedaan rata-rata antar subjek penelitian.

Selanjutnya perhitungan *Relative Standar Deviation* (RSD) atau koefisien variasi menunjukkan rasio antara standar deviasi dengan nilai rata-rata. Nilai RSD memberikan nilai persentase tanpa unit pengukuran. Nilai RSD yang kecil menunjukkan semakin tinggi presisi atau ketepatan pengukuran yang dilakukan. Semakin kecil nilai koefisien variasi maka data semakin homogen/seragam namun sebaliknya apabila semakin besar nilai koefisien variasi maka data semakin heterogen. Perhitungan RSD menggunakan persamaan sebagai berikut (Montgomery, 2017).

$$RSD = \frac{SD}{\bar{X}} \quad (1)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum Xi^2 - \frac{(\sum Xi)^2}{n}}{n-1}} \quad (2)$$

Dimana SD adalah Standar Deviasi dengan $\sum Xi^2$ merupakan jumlah kuadrat pengukuran individu, $\sum Xi$ adalah umlah pengukuran individu dengan n adalah jumlah sampel yang dianalisis dan \bar{X} adalah nilai rerata dari data yang tersedia.

Selanjutnya data pengukuran langsung di lapangan (*on-site*) dan data uji laboratorium diolah untuk mengetahui *removal efficiency*, *nitrification & denitrification efficiency*, *TN removal* dan analisa konsumsi energi. *Removal efficiency* COD dan fosfat dengan memakai persamaan

$$\text{Efisiensi Removal} = \frac{C_{in} - C_{ef}}{C_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana C_{in} adalah konsentrasi pada influen (mg/l) dan C_{ef} adalah konsentrasi pada efluen (mg/l) selanjutnya untuk *nitrification efficiency*, *denitrification efficiency* dan *TN removal* memakai persamaan sebagai berikut (von Sperling, 2007).

$$\text{Efisiensi Nitrifikasi} = 1 - \frac{NH_3N_{out}}{NH_3N_{in}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{Efisiensi Denitrifikasi} = 1 - \frac{(NO_2N_{out} + NO_3N_{out})}{(NH_3N_{in} - NH_3N_{out})} \quad (5)$$

$$TN\ Removal = 1 - \frac{(NH_3N_{out} + NO_2N_{out} + NO_3N_{out})}{(NH_3N_{in} + NO_2N_{in} + NO_3N_{in})} \quad (6)$$

Dimana NH_3-N_{in} adalah konsentrasi amonia influen, NH_3-N_{out} adalah konsentrasi amonia efluen, NO_2-N_{in} adalah konsentrasi nitrit influen, NO_2-N_{out} adalah konsentrasi nitrit influen, NO_3-N_{in} adalah konsentrasi nitrat influen dan NO_3-N_{out} adalah

onsentrasi nitrat influen. Sedangkan perhitungan konsumsi energi menggunakan persamaan:

$$kWh/g\text{-removed} = \frac{\text{total penggunaan energi}}{\text{mean removal}} \quad (7)$$

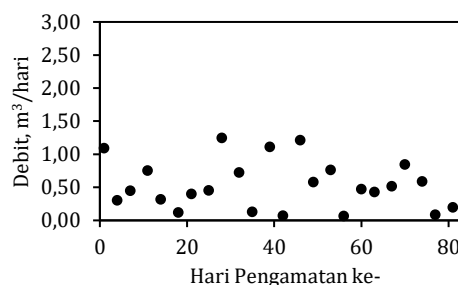
Dimana total penggunaan energi adalah total penggunaan energi pada pompa inlet (ekualisasi), pompa MBG (Aerasi 1&2), pompa 4 *submersible* dan *mean removal* merupakan rata-rata penyisihan polutan PO_4-P , NH_3-N , TN dan COD (g).

3. Hasil dan Pembahasan

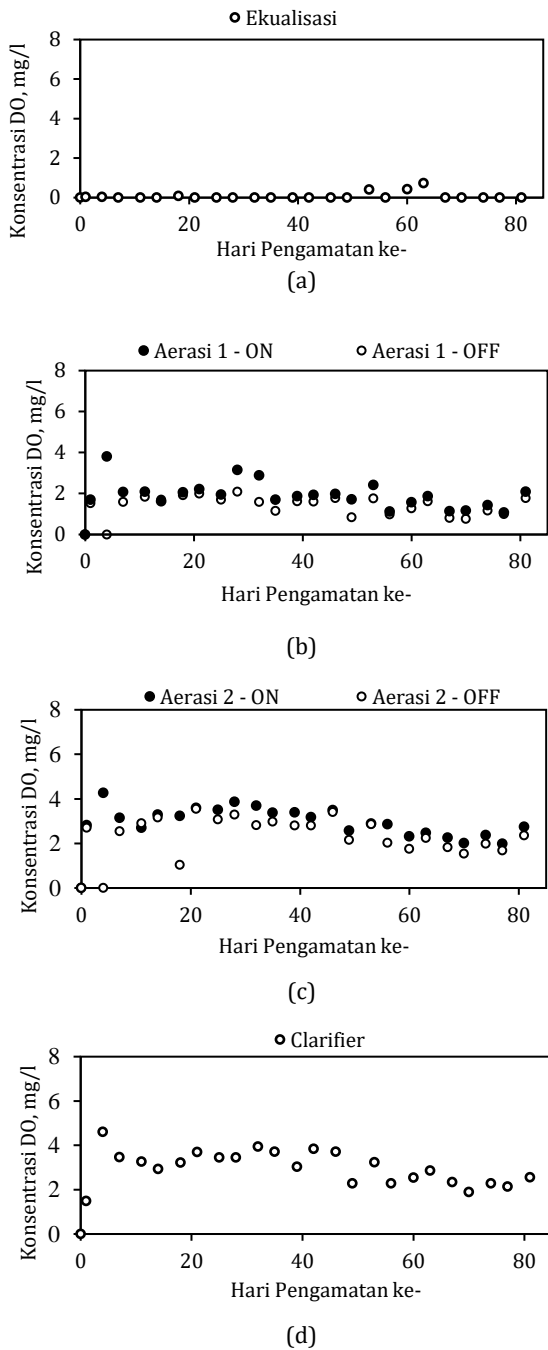
3.1 Analisis Debit

Debit rerata harian pada IPAL BR sebesar 0,54 m^3 /hari dengan debit minimum sebesar 0,06 m^3 /hari dan debit maksimum sebesar 1,25 m^3 /hari. Koefisien variasi pada debit harian pada IPAL sebesar 1,47. Nilai koefisien variasi tergolong kecil sehingga penyebaran nilai debit IPAL tidak terlalu jauh dari nilai debit rata-rata maka data cukup stabil. Gambar 2 menunjukkan profil debit air limbah harian pada IPAL selama 81 hari pengamatan.

Grafik diatas menunjukkan fluktuasi naik dan turunnya debit influen pada IPAL pada hari Kamis dan Minggu pada setiap minggunya. Debit maksimum terjadi di hari pengamatan ke-28 yaitu sebesar 1,25 m^3 /hari. Sedangkan debit terendah terjadi pada hari pengamatan ke-56 yaitu sebesar 0,06 m^3 /hari. Fluktuasi debit influen pada IPAL dipengaruhi oleh penggunaan air oleh mahasiswa di asrama untuk mencuci pakaian ditandai dengan adanya buih pada air limbah di tangki ekualisasi atau pun minimnya penggunaan air oleh mahasiswa untuk mandi dan mencuci karena pada masa pandemi, perkuliahan dilakukan secara daring. Di masa pandemi, saat pengamatan dilakukan jumlah penghuni asrama berbeda cukup jauh dengan kondisi normal yaitu paling banyak 25 mahasiswa dibandingkan dengan kondisi normal yang bisa mencapai 70 mahasiswa.



Gambar 2 Debit Harian IPAL



Gambar 3 Hasil Pengukuran Kadar DO (a) Tangki Ekualisasi (b) Tangki Aerasi 1 (c) Tangki Aerasi 2 (d) Tangki Clarifier

3.2 Profil Oksigen Terlarut (DO)

Dissolved oxygen (DO) atau oksigen terlarut merupakan parameter kualitas air yang diukur dalam bentuk konsentrasi yang dinyatakan dalam mg O₂/l yang digunakan sebagai salah satu parameter kimia untuk mengetahui kualitas air limbah. Kadar DO dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain antara lain

suhu, salinitas, tekanan atmosfer, kandungan mikroorganisme serta kekeruhan dan konsentrasi senyawa yang terkandung pada air limbah. Gambar 3 menyajikan profil kadar DO pada IPAL.

Grafik tersebut menunjukkan kadar DO pada keseluruhan tangki pengolahan. Pada tangki ekualisasi, hasil pengukuran DO cukup rendah yaitu sebesar 0,0 – 0,72 mg/l, air limbah pada tangki ekualisasi sangat keruh dan memiliki bau yang busuk. Jika oksigen hanya sedikit maka bakteri aerob akan cepat mati karena *supply* oksigen sedikit dan bakteri anaerobik mulai tumbuh. Bakteri anaerobik akan mendekomposisi dan menggunakan oksigen yang disimpan dalam molekul-molekul yang sedang dihancurkan. Hasil dari kegiatan bakteri anaerobik dapat membentuk hidrogen sulfida (H₂S), gas yang berbau busuk (Rizki et al., 2017).

On-off aeration atau aerasi yang berlangsung secara intermitten pada IPAL BR menggunakan *Microbubble Generator* (MBG) secara kontinyu akan meningkatkan kadar oksigen dalam air. Proses *on-off aeration* terjadi pada tangki aerasi 1 dan tangki aerasi 2 dengan aerasi dan tanpa aerasi masing-masing selama 15 menit. Dari grafik dapat diketahui bahwa saat kondisi aerobik kadar DO lebih tinggi dibandingkan saat kondisi anoksik. Hal ini disebabkan karena saat *on-aeration*, air limbah mendapatkan *supply* oksigen dari MBG sehingga oksigen terlarut pada air limbah akan naik. Namun setelah kondisi *off-aeration*, kadar DO pada air limbah menurun karena kandungan oksigen rendah. Kadar DO tertinggi pada kedua tangki aerasi adalah sebesar 3,87 mg/l pada tangki aerasi 1 dan 4,27 mg/l pada aerasi 2. Sedangkan kadar oksigen terlarut terendah pada kedua tangki aerasi sebesar 1,07 mg/l pada tangki aerasi 1 dan 1,99 mg/l pada tangki aerasi 2.

Pada tangki *clarifier* kadar DO tertinggi mencapai 4,61 mg/l. Walaupun tidak ada *supply* oksigen pada tangki *clarifier*, namun kadar DO cukup tinggi. Hal ini disebabkan karena air limbah yang tertampung pada tangki *clarifier* sudah melalui 2 tahap proses pengolahan secara aerasi pada pengolahan sebelumnya pada tangki aerasi, air limbah mendapatkan tambahan *supply* oksigen sehingga air limbah yang tertampung pada tangki *clarifier* memiliki kadar DO yang relatif tinggi.

3.3 Konsentrasi Efluen

Tabel 3 menyajikan konsentrasi efluen parameter pencemar pada setiap tangki pengolahan IPAL. Dari tabel 3 dapat dilihat bahwa konsentrasi efluen COD dan amonia sudah memenuhi baku mutu. Sedangkan konsentrasi efluen PO₄-P belum memenuhi baku mutu.

Tabel 3 Konsentrasi Efluen IPAL

	Influen	Aerasi 1	Aerasi 2	Efluen
COD, mg/l				
Min	10,67	2,67	6,67	1,33
Maks	136,00	32,00	29,33	24,00
Rerata	62±30,77	13,39±7,75	14,22±6,38	13,17±6,94
Baku Mutu*	100	100	100	100
PO ₄ -P, mg/l				
Min	3,60	3,30	3,50	3,40
Maks	17,63	9,07	7,77	7,73
Rerata	9,28±3,43	5,31±1,48	5,13±1,19	5,11±1,15
Baku Mutu**	5	5	5	5
NH ₃ -N, mg/l				
Min	4,12	0,08	0,06	0,08
Maks	37,95	20,65	8,34	7,76
Rerata	14,58±8,5	4,02±4,48	2,64±2,04	2,66±1,96
Baku Mutu*	10	10	10	10
NO ₂ -N, mg/l				
Min	0,01	0,01	0,02	0,04
Maks	0,05	0,46	0,38	0,38
Rerata	0,01±0,01	0,21±0,11	0,22±0,1	0,22±0,09
NO ₃ -N, mg/l				
Min	1,20	1,70	1,93	1,90
Maks	2,80	3,60	3,97	4,27
Rerata	1,96±0,4	2,57±0,53	2,71±0,57	2,76±0,55
TN, mg/l				
Min	5,34	1,95	2,07	2,16
Maks	40,40	23,39	10,84	10,40
Rerata	16,55±8,68	6,8±4,57	5,56±2,13	5,64±2,13

Keterangan:

* : PerMenLHK No 68 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik

** : PerDa DIY No 7 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Limbah kategori IPAL Domestik Komunal

Namun secara keseluruhan IPAL mampu menurunkan efluen parameter kualitas air limbah dengan baik dengan adanya penurunan konsentrasi efluen pada setiap tangki pengolahannya mulai dari influen tangki ekualisasi hingga efluen tangki *clarifier*.

Rasio rata-rata C:N:P pada tangki aerasi 1 sebesar 6.5 : 1.8 : 1 dan pada tangki aerasi 2 sebesar 2.6 : 0.5 : 1.0. Rasio C:N:P yang baik untuk pengolahan air limbah adalah sebesar 100:5:1 untuk proses pengolahan secara aerobik (Metcalf & Eddy, 2003) dengan asumsi bahwa penyisihan COD adalah 100% dan kandungan nitrogen dari biomassa adalah 12,3%. Berdasarkan hasil rasio C:N:P pada IPAL BR, jumlah nutrien pada influen tangki aerasi cenderung berlebih. Sedangkan rasio C/N pada tangki aerasi 1 sebesar 4,2 dan pada tangki aerasi 2 sebesar 5,6. Hal ini menunjukkan rasio C/N pada tangki aerasi 2 lebih besar dibandingkan dengan aerasi 1. Semakin tinggi rasio C/N maka penyisihan nitrogen akan semakin baik. Rasio C/N pada umumnya berupa rasio COD/TN yang merupakan parameter penting dalam penyisihan nitrogen. Jumlah karbon dan nitrogen dapat mempengaruhi metabolisme mikroorganisme pada air limbah. Semakin tinggi rasio C/N maka efisiensi penyisihan nitrogen semakin baik.

Tabel 4 Efisiensi Penyisihan IPAL

Removal, %		s.d. Aerasi 1	s.d. Aerasi 2	s.d. Clarifier
COD	min	22,22	25,00	44,44
	max	95,65	88,24	95,65
	rerata	73,6±17,46	72,16±15,45	75,96±13,25
	p value	p(0,76) > α(0,05)		
PO ₄ -P	min	-4,63	-14,81	-20,37
	max	63,24	64,52	64,27
	rerata	39,12±14,96	40,14±17,25	40,2±17,85
	p value	p(0,98) > α(0,05)		
Nitrifi-cation	min	23,17	33,64	46,27
	max	99,47	99,64	99,47
	rerata	73,1±20,07	80,01±14,65	80,3±12,63
	p value	p(0,27) > α(0,05)		
Denitrifi-cation	min	-22,79	1,82	14,45
	max	88,75	91,23	90,93
	rerata	61,72±27,48	63,94±25,06	64,78±21,54
	p value	p(0,02) < α(0,05)		
TN	min	11,88	16,81	23,88
	max	88,91	88,20	87,70
	rerata	56,15±1,6	60,88±18,17	60,88±16,48
	p value	p(0,54) > α(0,05)		

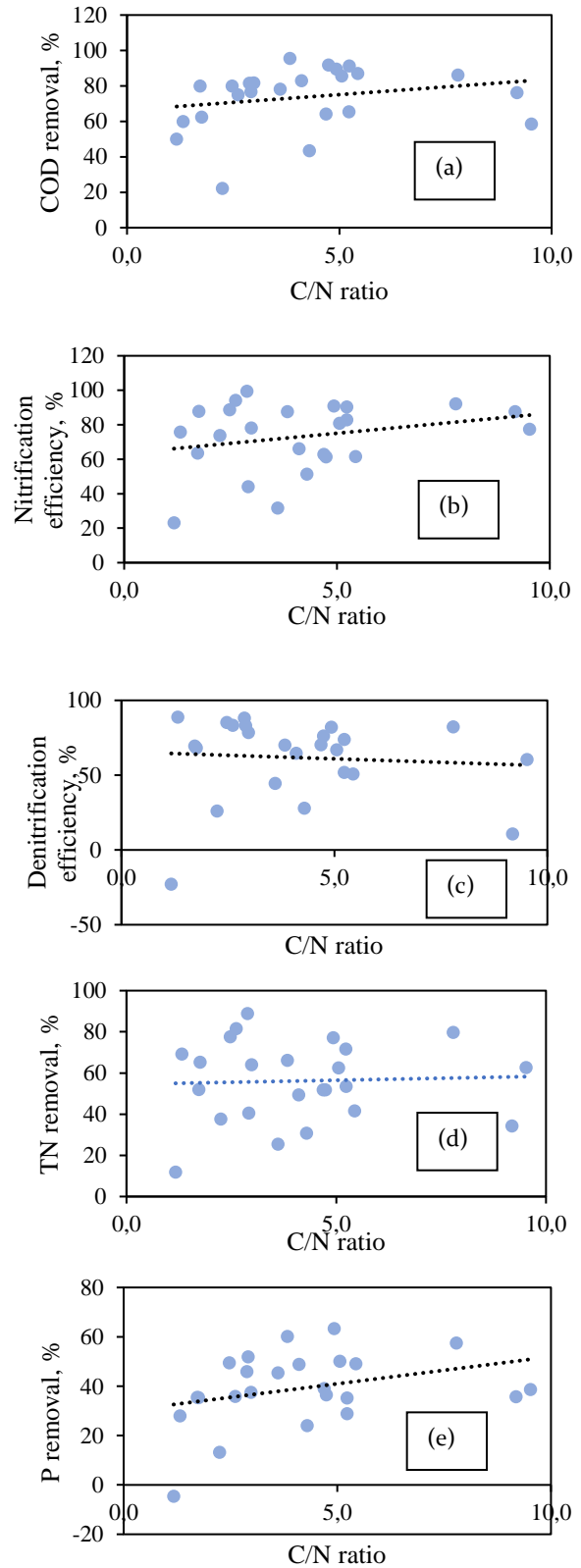
3.4 Performa Removal

Analisa penyisihan parameter pencemar pada IPAL meliputi penyisihan COD, Total Nitrogen (TN), Nitrifikasi-Denitrifikasi dan Fosfat ($PO_4\text{-P}$). Penelitian dilakukan selama 81 hari dengan nilai OLRv (Organic Loading Rate) aktual sebesar 179,28 kg COD/hari/m³ dan OLRv rencana sebesar 2688 kg COD/hari/m³.

Nilai OLRv rencana dan aktual pada IPAL BR memiliki perbedaan yang cukup jauh. Nilai OLRv aktual hanya sebesar 6% dari nilai OLRv rencana. Hal ini disebabkan karena penelitian dilakukan pada saat masa pandemi Covid-19 yang mengakibatkan penghuni asrama jumlahnya sangat sedikit (< 20 orang) dibandingkan dengan penghuni asrama yang sebelum pandemi mencapai ± 84 orang, sehingga jumlah pemakaian air oleh penghuni asrama mempengaruhi debit air limbah yang masuk ke IPAL dan menyebabkan nilai OLRv aktual pada saat dilakukan penelitian sangat kecil. Efisiensi penyisihan parameter kualitas air limbah pada IPAL disajikan pada Tabel 4. Hasil penyisihan parameter pencemar kualitas air limbah pada IPAL secara umum telah menunjukkan hasil yang cukup baik untuk masing-masing parameter. Namun nilai rata-rata efisiensi denitrifikasi masih menunjukkan nilai negatif pada tangki aerasi 1.

Hal ini disebabkan oleh adanya peningkatan konsentrasi influen nitrat pada tangki aerasi 1. Selain itu, efisiensi penyisihan pada tangki aerasi 1 dan aerasi 2 menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda. Data diatas menunjukkan bahwa performa tangki aerasi 2 memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan efisiensi penyisihan pada tangki aerasi 1 walaupun nilainya tidak jauh berbeda karena pada kedua tangki tersebut dilakukan aerasi secara *intermittent* dengan fase aerasi dan tanpa aerasi, masing-masing selama 15 menit. Kinerja kedua tangki pengolahan tersebut menunjukkan performa yang hampir sama, menurut uji statistik yang telah dilakukan, secara keseluruhan keberadaan tangki aerasi 2 tidak memiliki pengaruh yang signifikan dalam menyisihkan parameter pencemar.

Rata-rata efisiensi denitrifikasi yang masih menunjukkan nilai negatif dan dapat disebabkan oleh rasio C/N yang merupakan parameter utama dalam denitrifikasi. Rasio C/N menunjukkan jumlah material organik yang ada pada air limbah. Proses denitrifikasi dapat ditingkatkan dengan rasio C/N yang tinggi. Proses nitrifikasi dan denitrifikasi juga sangat erat kaitannya. Ketika amonia teroksidasi menjadi nitrat dengan aerasi selama proses nitrifikasi maka peningkatan rasio C/N bertujuan menciptakan proses denitrifikasi nitrat yang lebih baik (Zhuang et al., 2019). Gambar 4 menyajikan hubungan rasio C/N dengan efisiensi penyisihan parameter pencemar.



Gambar 4 Hubungan Rasio C/N terhadap Efisiensi Penyisihan (a) Penyisihan COD (b) Nitrifikasi (c) Denitrifikasi (d) Penyisihan TN (e) Penyisihan Fosfat

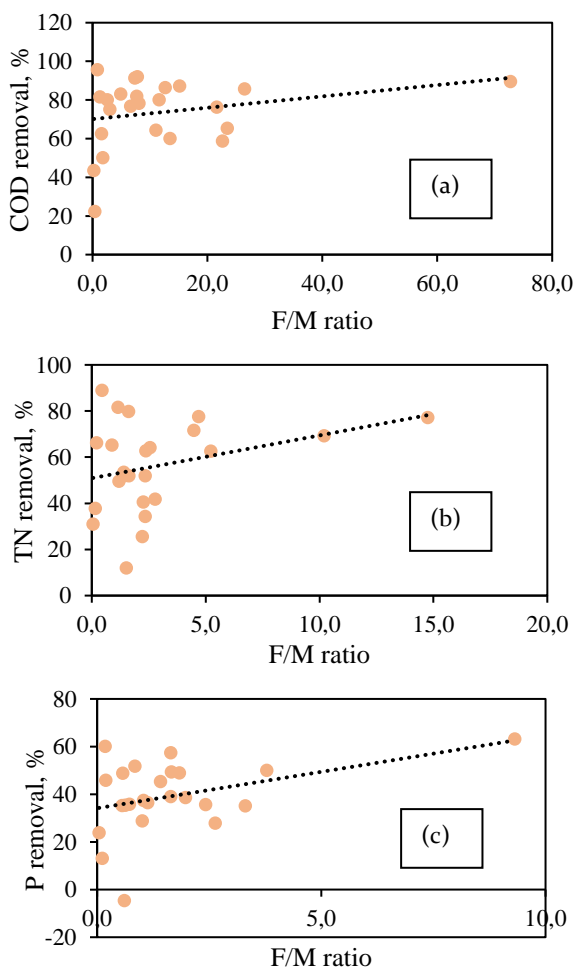
Hubungan rasio C/N terhadap penyisihan COD, fosfat, nitrifikasi dan TN memiliki nilai masing-masing sebesar 0,22 ; 0,33 ; 0,26 dan 0,04. Nilai tersebut menunjukkan kedua variabel memiliki nilai yang positif (+) yang berarti mempunyai hubungan yang searah yang menunjukkan bahwa semakin besar nilai C/N maka efisiensi removal COD, fosfat, nitrifikasi dan TN semakin besar. Sedangkan rasio C/N pada denitrifikasi yaitu -0,08 yang menunjukkan rasio C/N dan removal TN memiliki hubungan linear negatif (-) yaitu nilai rasio C/N berbanding terbalik dengan efisiensi denitrifikasi, semakin besar rasio C/N maka efisiensi denitrifikasi akan semakin rendah. Efisiensi penyisihan nitrogen dengan nilai rasio C/N <5 termasuk buruk, 5 -7 termasuk sedang, 7 - 9 termasuk baik dan >9 termasuk sangat baik (Grady et al., 1999). Berdasarkan kategori tersebut, efisiensi penyisihan nitrogen pada tangki aerasi 1 pada IPAL BR masih tergolong kedalam kategori buruk.

Menurut hasil penelitian (Gou et al., 2019) mengenai pengaruh rasio C/N pada *suspended growth bioreactors* menunjukkan bahwa penyisihan NH₃-N dan NO₂-N saat rasio C/N sebesar 10, mengalami peningkatan secara signifikan dibandingkan saat C/N sebesar 15, 20 dan 25 ($p < 0,05$). Selanjutnya hasil penelitian tersebut menunjukkan peningkatan rasio C/N dapat mempengaruhi proses penyisihan total amonia nitrogen dalam air limbah, namun efisiensi penyisihan total amonia nitrogen tidak signifikan ($p > 0,05$) saat rasio C/N melebihi 20. Efisiensi penyisihan amonia nitrogen dengan rasio C/N 10, C/N 15, C/N 20 dan C/N 25 berturut-turut sebesar 88,67%; 94,98%; 100% dan 100%. Saat rasio C/N 10 dan C/N 15 terdapat sisa konsentrasi amonia, sedangkan saat rasio C/N 20 dan C/N 25 menunjukkan konsentrasi amonia hampir habis. Hal ini menunjukkan perbedaan rasio C/N pada air limbah berpengaruh terhadap konsentrasi amonia. Sedangkan untuk penyisihan COD, rasio C/N 10, C/N 15, C/N 20 dan C/N 25 masing-masing mencapai $91,15 \pm 1,03\%$, $91,06 \pm 0,57\%$, $95,09 \pm 0,91\%$ dan $95,53 \pm 0,84\%$ pada akhir percobaan.

Penyisihan parameter pencemar juga dipengaruhi oleh rasio F/M yang menunjukkan perbandingan antara jumlah zat organik dengan massa mikroorganisme dalam air limbah. Hubungan rasio F/M dengan efisiensi penyisihan parameter pencemar pada IPAL disajikan pada Gambar 5.

Nilai F/M pada IPAL BR hanya dilihat dari tangki aerasi 1. Hasil rerata F/M COD sebesar 11,9 gCOD/gTS/hari dengan penyisihan sebesar 73,6%, rerata F/M TN sebesar 2,8 gTN/gTS/hari dengan penyisihan sebesar 56,2% dan rerata F/M fosfat sebesar 1,6 gPO₄-P/gTS/hari dengan penyisihan sebesar 39,1%. Grafik diatas menunjukkan nilai koefisien korelasi (r) rasio F/M terhadap efisiensi penyisihan parameter pencemar. Hubungan rasio F/M terhadap penyisihan COD, TN dan P memiliki nilai 0,26; 0,39 dan 0,31. Nilai tersebut menunjukkan hubungan rasio F/M COD, F/M TN dan F/M fosfat terhadap efisiensi removal COD, TN dan fosfat memiliki hubungan linier positif (+) sehingga memiliki hubungan yang searah yang menunjukkan bahwa semakin besar nilai F/M COD, TN dan fosfat, maka efisiensi penyisihan COD, TN dan fosfat pada tangki aerasi 1 juga semakin besar.

Nilai rasio F/M COD, TN dan P terhadap massa TSS di IPAL BR termasuk tinggi yang berarti bahwa pada tangki aerasi beban sistem cukup berat. Rasio F/M yang rendah menunjukkan bahwa mikroorganisme dalam tangki aerasi dalam kondisi lapar dan semakin rendah rasio F/M proses pengolahan limbah semakin efisien dalam menyisihkan parameter pencemar (Febriyana, 2014). Tingginya nilai F/M menunjukkan adanya makanan yang berlebih pada air limbah sehingga dapat menyebabkan penurunan efisiensi penyisihan



Gambar 5 Hubungan Rasio F/M terhadap Efisiensi Penyisihan (a) Penyisihan COD (b) Penyisihan TN (c) Penyisihan Fosfat

parameter pencemar. Tingginya pertumbuhan mikroorganisme akan menyebabkan lumpur aktif yang terbentuk sulit mengendap dan akan terjadi *sludge bulking* (Zhang et al., 2017). Sedangkan nilai F/M yang berada dibawah batas standar dapat memicu pertumbuhan mikroorganisme yang berlebih yang tidak diimbangi dengan keberadaan nutrisi pada air limbah sehingga mikroorganisme akan mati dan terurai (Ayu et al., 2002). Menurut hasil penelitian (Mirbagheri et al., 2014) mengenai optimasi pengolahan air limbah menggunakan pengolahan lumpur aktif dengan kontak stabilisasi, rasio F/M yang meningkat diikuti dengan efisiensi penyisihan COD yang menurun yang diakibatkan oleh hasil produksi lumpur yang berlebih. Adanya peningkatan lumpur pada tangki pengendapan menyebabkan konsentrasi COD meningkat karena tingginya total padatan pada air limbah. Hasil penelitian menunjukkan rasio F/M yang optimal sebesar 0,38 dengan efisiensi penyisihan COD sebesar 96%.

3.5 Konsumsi Energi

Analisa konsumsi energi pada IPAL meliputi pompa inlet atau pompa rendam air kotor terletak pada tangki ekualisasi, pompa *recycle* 1 dan *recycle* 2 terletak pada tangki aerasi 1 dan aerasi 2 sebagai pompa resirkulasi sekaligus *on-off aeration* pada MBG dengan aerasi secara intermiten atau *on-off aeration* masing-masing selama 15 menit. Sedangkan pompa 4 merupakan pompa *submersible* yang terletak pada tangki *clarifier*. Konsumsi energi dihitung dalam kWh/m³ air limbah yang diolah. Tabel 5 menunjukkan total penggunaan energi dari keempat pompa di IPAL.

Dari data tersebut dapat diketahui bahwa penggunaan energi terbesar terdapat pada pompa *recycle* 1 dan *recycle* 2 dengan penggunaan energi ± 48%. Sistem aerasi memiliki konsumsi energi yang cukup besar dengan adanya proses resirkulasi juga membutuhkan energi pada tahap pengolahan air limbah. Menurut Bodík & Kubaská (2013) sistem aerasi dengan konsentrasi oksigen dibawah 1,5 – 2 mg/l membutuhkan energi yang lebih tinggi, pada sistem aerasi intermiten dapat terjadi proses denitrifikasi dengan konsentrasi oksigen telarut yang cukup rendah (< 2 mg/l) dan konsumsi energi dengan sistem aerasi menghabiskan 60 – 65% dari keseluruhan konsumsi energi pada tahap pengolahan lainnya dalam keseluruhan biaya pengoperasian IPAL. Dengan adanya data konsumsi energi pada pompa-pompa di IPAL, maka perlu dianalisis kebutuhan energi yang dibutuhkan untuk menyisihkan polutan atau parameter pencemar kualitas air limbah. Tabel 6 menyajikan hasil konsumsi energi dalam menyisihkan parameter pencemar.

Tabel 5 Total Penggunaan Energi

	Penggunaan energi, kWh				Total
	Pompa Inlet	Pompa Recycle 1	Pompa Recycle 2	Pompa 4	
kWh/m ³	0,50 3,50%	6,81 48,23%	6,80 48,13%	0,02 0,14%	14,13 100%
kWh/hari	0,27	3,66	3,66	0,01	7,6

Tabel 6 Konsumsi Energi dalam *Removal* Kontaminan

	COD	PO4-P	NH ₃ -N	TN
<i>mean removal</i> , mg/l	48,83	4,17	11,91	10,92
<i>mean removal</i> , g	976,67	83,44	238,29	218,39
kWh/g-removed	0,45	5,10	1,79	1,95
g-removed/kWh	2,24	0,20	0,56	0,51

Tabel 7 Konsumsi Energi Total

Keterangan	Satuan	Hasil
Debit rerata	l/hari	537,84
Energi	kWh/m ³	14,13
Asumsi	hari/bulan	30
Debit	m ³ /bulan	16,14
Energi	kWh/bulan	227,94
Tarif	Rp./kWh	1.445
Biaya	Rp./bulan	329.371
	Rp./m ³	20.414

Dari data diatas dapat diketahui urutan penggunaan energi terbesar adalah penyisihan fosfat yaitu 5,10 kWh/gPO₄-P, kemudian penyisihan amonia sebesar 1,79 kWh/gNH₃-N, penyisihan TN sebesar 1,95 kWh/gTN dan penyisihan COD sebesar 0,45 kWh/gCOD. Efisiensi energi akan optimal ketika *removal* kontaminan tinggi dan begitu juga sebaliknya, efisiensi energi akan memiliki kinerja yang buruk ketika *removal* kontaminan rendah (Li et al., 2019). Menurut penelitian (Lang et al., 2020) mengenai pengolahan air limbah dengan proses elektro oksidasi, konsumsi energi yang dibutuhkan untuk menyisihkan amonia sebesar 0,556 kWh/gNH₃-N dan penyisihan COD sebesar 0,026 kWh/gCOD dengan total penggunaan energi sebesar 0,27 kWh/m³. Hasil penelitian tersebut memiliki kondisi yang sama dengan hasil penelitian dimana konsumsi energi untuk menyisihkan amonia lebih besar dibandingkan dengan penyisihan COD. Tabel 7 menyajikan konsumsi energi total dan biaya yang dibutuhkan IPAL.

Dari tabel diatas dapat diketahui konsumsi energi IPAL dalam 1 m³ adalah 14,13 kWh. Biaya yang

dibutuhkan IPAL sebesar Rp. 329.371/bulan dan Rp. 20.414/m³ air limbah yang masuk. Konsumsi energi pada IPAL sangat ditentukan oleh kualitas air limbah yang masuk. Konfigurasi proses dan kapasitas pengolahan, kemudian efisiensi penggunaan energi memiliki kinerja yang buruk ketika penyisihan polutan tinggi dan begitu juga sebaliknya. Semakin tinggi debit air limbah teorilah maka konsumsi energi semakin kecil (Li et al., 2019). Perhitungan konsumsi energi yang dilakukan berdasarkan nilai kWh/m³ dalam setiap m³ yang masuk pada IPAL, sehingga debit resirkulasi tidak berpengaruh. kWh/m³ pada pompa inlet dipengaruhi oleh debit aktual yang mengalir dan pompa 4 (*submersible*) untuk menaikkan hasil olahan air limbah ke tangki penampungan di lantai 4 gedung asrama dipengaruhi oleh seberapa banyak penggunaan kembali air hasil olahan untuk menyiram tanaman di lingkungan sekitar asrama.

4. Kesimpulan

Hasil evaluasi performa IPAL dalam menyisihkan beban pencemar pada masing-masing tangki pengolahan dapat dikatakan cukup baik, karena IPAL telah berada pada kondisi *steady state* saat dilakukan pengamatan. Parameter COD dan amonia telah memenuhi baku mutu PerMenLHK No. 68 Tahun 2016. Sedangkan parameter fosfat masih belum memenuhi baku mutu PerDa DIY No.7 Tahun 2016, sehingga performa penyisihan fosfat masih perlu dioptimalkan. Hasil evaluasi performa IPAL menunjukkan bahwa tangki aerasi 2 tidak memiliki pengaruh yang signifikan dalam menyisihkan parameter pencemar. Tangki aerasi 2 bertujuan untuk membantu proses aerasi pada IPAL dapat berjalan dengan baik ketika debit air limbah cukup tinggi. Namun, kinerja tangki aerasi 2 tidak menunjukkan pengaruh yang cukup besar pada proses pengolahan di IPAL saat pengamatan dilakukan, dikarenakan beban influen pada IPAL jauh dari beban desainnya. Rerata efisiensi penyisihan pada tangki aerasi 1 pada parameter COD sebesar 73,6±17,46%; PO₄-P sebesar 39,12±14,96%; Nitrifikasi sebesar 73,1±20,07%; Denitrifikasi sebesar 61,72±27,48%; TN, 56,15±19,6%.

Total konsumsi energi yang dibutuhkan IPAL dalam proses pengolahan *grey water* menggunakan MBG dengan aerasi intermiten dengan debit rerata 537,84 l/hari membutuhkan energi sebesar 14,12 kWh/m³ dan biaya sebesar Rp. 20.414/m³ dengan urutan penggunaan energi terbesar untuk penyisihan fosfat sebesar 83,44 gram adalah 5,10 kWh/gPO₄-P, kemudian penyisihan amonia sebesar 11,91 gram adalah 1,79 kWh/gNH₃-N, penyisihan TN sebesar 10,92

gram adalah 1,95 kWh/gTN dan penyisihan COD sebesar 48,83 gram adalah 0,45 kWh/gCOD.

Daftar Pustaka

- Ajit, K. (2016). A Review on Grey Water Treatment and Reuse. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2395-56. <https://www.irjet.net/archives/V3/i5/IRJET-V3I5551.pdf>
- Ayu, C., Anggraeni, D., Kurniasari, S., & Ismail, T. (2002). *Penggunaan Membran Bioreaktor (Mbr) Pada Activated Sludge Dalam Pengolahan Limbah Cair Industri*. 2309105004.
- Bodík, I., & Kubaská, M. (2013). Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant. *Environment Protection Engineering*, 39(2), 15-24. <https://doi.org/10.5277/EPE130202>
- Cassidy, J., Silva, T., Semião, N., Ramalho, P., Santos, A., & Feliciano, J. (2020). Improving wastewater treatment plants operational efficiency and effectiveness through an integrated performance assessment system. *H2Open Journal*, 3(1), 276-287. <https://doi.org/10.2166/h2oj.2020.007>
- Derco, J., Urminská, B., Kovács, A., & Šimkovič, K. (2017). Biological nutrient removal in an intermittently aerated bioreactor. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 31(2), 179-185. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2016.1026>
- Febriyana, R. F. (2014). Prototype Unit Pengolahan Limbah (Activated Sludge Biosand Filter Reactor) Untuk Menurunkan Kadar Chemical Oxygen Demand (COD), Biological Oxygen Demand (BOD) Dan Total Suspended Solid (TSS) Pada Limbah Cair Tahu. In *Implementation Science* (Vol. 39, Issue 1). <https://doi.org/10.4324/9781315853178>
- Gou, J., Hong, C. U., Deng, M., Chen, J., Hou, J., Li, D., & He, X. (2019). Effect of carbon to nitrogen ratio on water quality and community structure evolution in suspended growth bioreactors through biofilm technology. *Water (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/w11081640>
- Grady, L., Daigger, G., & Lim, H. (1999). *Biological Wastewater Treatment, 2nd editon*. Marcel Dekker. Inc.
- Gürtekin, E. (2019). Effect of Intermittent Aeration and Step-Feed on Nitrogen Removal Performance in Anoxic-aerobic Sequencing Batch Reactor. *Natural and Engineering Sciences*, 8(5), 55.
- Karches, T. (2018). Effect of internal recirculation on reactor models in wastewater treatment. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 228(May), 145-153. <https://doi.org/10.2495/WP180151>
- Kolb, M., Bahadir, M., & Teichgräber, B. (2017). Determination of chemical oxygen demand (COD) using an alternative wet chemical method free of mercury and dichromate. *Water Research*, 122, 645-654. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.034>
- Lang, Z., Zhou, M., Zhang, Q., Yin, X., & Li, Y. (2020). Comprehensive treatment of marine aquaculture wastewater by a cost-effective flow-through electro-oxidation process. *Science of the Total Environment*, 722,

137812.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137812>
- Li, Z., Zou, Z., & Wang, L. (2019). Analysis and Forecasting of the Energy Consumption in Wastewater Treatment Plant. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8690898>
- Liu, C., Tanaka, H., Ma, J., Zhang, L., Zhang, J., Huang, X., & Matsuzawa, Y. (2012). Effect of microbubble and its generation process on mixed liquor properties of activated sludge using Shirasu porous glass (SPG) membrane system. *Water Research*, 46(18), 6051–6058. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.08.032>
- Metcalf, & Eddy. (2003). Metcalf & Eddy, Inc. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. In *Journal of Wastewater Engineering* (p. 4th edition).
- Mirbagheri, S. A., Ebrahimi, M., & Mohammadi, M. (2014). Optimization method for the treatment of Tehran petroleum refinery wastewater using activated sludge contact stabilization process. *Desalination and Water Treatment*, 52(1–3), 156–163. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.794105>
- Montgomery, D. C. A. S. U. (2017). *Design and Analysis of Experiments Ninth Edition*. www.wiley.com/go/permissions. <https://lcn.loc.gov/2017002355>
- Octy, R., Budhijanto, W., Kimia, D. T., Teknik, F., & Mada, U. G. (2015). Penguraian Limbah Organik Secara Aerobik Dengan Aerasi Menggunakan Microbubble Generator Dalam Kolam Dengan Imobilisasi Bakteri. *Jurnal Rekayasa Proses*, 9(2), 58–64. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.31035>
- Rizki, N., Sutrisno, E., & Sumiyati, S. (2017). Penurunan Konsentrasi COD Dan TSS Pada Limbah Cair Tahu Dengan Teknologi Kolam (Pond) - Biofilm Menggunakan Media Biofilter Jaring Ikan Dan Biobal. *Psychology Applied to Work: An Introduction to Industrial and Organizational Psychology, Tenth Edition Paul*, 53(9), 1689–1699.
- Suharto. (2011). *Limbah Kimia dalam Pencemaran Udara dan Air* (Issue 321, pp. 313–317). Andi.
- Terasaka, K., Hirabayashi, A., Nishino, T., Fujioka, S., & Kobayashi, D. (2011). Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge. *Chemical Engineering Science*, 66(14), 3172–3179. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.02.043>
- Torrijos, V., Gonzalo, O. G., Trueba-Santiso, A., Ruiz, I., & Soto, M. (2016). Effect of by-pass and effluent recirculation on nitrogen removal in hybrid constructed wetlands for domestic and industrial wastewater treatment. *Water Research*, 103, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.028>
- Uggetti, E., Hughes-Riley, T., Morris, R. H., Newton, M. I., Trabi, C. L., Hawes, P., Puigagut, J., & García, J. (2016). Intermittent aeration to improve wastewater treatment efficiency in pilot-scale constructed wetland. *Science of the Total Environment*, 559, 212–217. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.195>
- von Sperling, M. (2007). *Wastewater Characteristic, Treatment and Disposal* (Vol. 1).
- Zhang, X., Zheng, S., Xiao, X., Wang, L., & Yin, Y. (2017). Simultaneous nitrification/denitrification and stable sludge/water separation achieved in a conventional activated sludge process with severe filamentous bulking. *Bioresource Technology*, 226, 267–271. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.047>
- Zhao, L., Dai, T., Qiao, Z., Sun, P., Hao, J., & Yang, Y. (2020). Application of artificial intelligence to wastewater treatment: A bibliometric analysis and systematic review of technology, economy, management, and wastewater reuse. *Process Safety and Environmental Protection*, 133(92), 169–182. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.014>
- Zhuang, L. L., Yang, T., Zhang, J., & Li, X. (2019). The configuration, purification effect and mechanism of intensified constructed wetland for wastewater treatment from the aspect of nitrogen removal: A review. *Bioresource Technology*, 293(July). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122086>