

STABILITAS PERFORMA DAN RELIABILITAS IPAL DOMESTIK DENGAN KOMBINASI AERASI SECARA INTERMITTENT DENGAN RESIRKULASI EFLUEN DAN *MICROBUBBLE GENERATOR*

Johan Syafri Mahathir AHMAD^{1*}, Hafasatya Maharani PUTRI², Nurul Ainun SANTONI¹, Sri Puji SARASWATI³

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

²Magister Teknik Sistem, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

*Email korespondensi: johan.syafri.ma@ugm.ac.id

[diterima: 26 Mei 2021, disetujui: 9 Juni 2021]

ABSTRACT

Recently, various technology has been applied to the domestic wastewater treatment plant (WWTP); however, the reliability, compliance to standards and performance are not well understood. This study discusses the reliability of WWTP in Bulaksumur Residence in terms of compliance to effluent quality standards (for direct discharge) and class IV water quality standards (for irrigation water potential use). The WWTP operates continuously, and its performance was observed for 82 days. This WWTP uses an intermittent aeration system by utilizing wastewater recirculation coupled with a microbubble generator (MBG) nozzle. From the observations, the WWTP shows good and stable performance indicated by its TSS, COD, PO₄-P removal efficiency of 68,9±12,9%, 78,4±9,8%, 45,3±8,6% and 63,4±13,7%, respectively, as well as its nitrification, nitration and denitrification efficiency (83,1±7,9%, 97,6±2,0% and 67,2±19,3%, respectively). Effluent quality of TSS (4,6±3,4 mg/l), COD (13,9±6,6 mg/l), and NH₃-N (2,4±2,4 mg/l) shows 100% compliance to both regulation standards for effluent discharge and class IV water quality. Likewise for NO₃-N (2,8±0,5 mg/l) also show 100% compliance to both standards. As for NH₃-N (2,4±2,4 mg/l) and NO₂-N (0,22±0,99) only showed similar poor reliability of 8.3% compliance to class IV water quality standards. The results of this research are expected to contribute to the development and improvement of MBG technology and the optimum aeration strategy to produce WWTP with stable performance and good reliability.

Keywords: WWTP reliability and stability, intermittent aeration, microbubble, recirculation.

INTISARI

Berbagai macam teknologi telah diterapkan pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) domestik, namun tidak diketahui secara pasti realibitas dan kinerjanya. Penelitian ini membahas tentang realibilitas IPAL di Bulaksumur *Residence* untuk pemenuhan standar kualitas efluen jika efluen akan dibuang langsung ke lingkungan dan standar kualitas air kelas IV jika efluen IPAL akan digunakan sebagai air penyiraman taman. IPAL beroperasi secara kontinyu dan kinerja IPAL diamati selama 82 hari. IPAL menggunakan sistem aerasi *intermittent* dengan memanfaatkan resirkulasi air limbah dengan pemasangan *microbubble generator* (MBG) menunjukkan performa yang baik dan stabil. Efisiensi *removal* TSS, COD, PO₄-P dan TN berturut-turut sebesar 68,9±12,9%, 78,4±9,8%, 45,3±8,6% dan 63,4±13,7%. Performa yang sangat baik juga terlihat pada efisiensi nitritasi, nitrifikasi dan denitrifikasi berturut-turut sebesar 83,1±7,9%, 97,6±2,0% dan 67,2±19,3%. Kualitas efluen untuk parameter TSS (4,6±3,4 mg/l), COD (13,9±6,6 mg/l) dan NH₃-N (2,4±2,4 mg/l) menunjukkan reliabilitas 100% baik untuk memenuhi standar kualitas air efluen maupun air kelas IV. Begitu pula untuk NO₃-N (2,8±0,5 mg/l) juga menunjukkan reliabilitas 100% untuk memenuhi standar kualitas air kelas IV. Sedangkan untuk NH₃-N (2,4±2,4 mg/l) dan NO₂-N (0,22±0,99) hanya menunjukkan reliabilitas sebesar masing-masing 8,3%. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap perkembangan teknologi dan strategi operasional IPAL terutama dengan teknologi MBG untuk menghasilkan kinerja yang stabil dan memiliki reliabilitas yang tinggi.

Kata kunci: Reliabilitas dan stabilitas IPAL, aerasi *intermittent*, *microbubble*, resirkulasi.

PENDAHULUAN

Air limbah domestik yang dibuang langsung tanpa diolah baik diresapkan ke tanah maupun ke badan air dapat berakibat buruk bagi lingkungan. Kandungan bakteri *E.coli* yang tinggi di air tanah merupakan salah satu indikasi bahwa air tanah sudah tercemar oleh air limbah domestik (Rompas et al., 2019). Menurunnya indeks kualitas air di Sungai Gajah Wong, Yogyakarta (Putro, 2017; Saraswati et al., 2019) juga dapat menjadi indikasi terjadinya pencemaran yang salah satu penyebab utamanya adalah pembuangan air limbah domestik tanpa diolah. Meskipun tidak menunjukkan relevansi secara langsung terhadap kondisi biotik di badan air, kadar COD dapat merepresentasikan tingginya pencemar organik di badan air (Niemi et al., 2006), sedangkan kadar nutrien yang tinggi di badan air dapat meningkatkan pertumbuhan fitoplankton yang dapat menyebabkan terjadinya *algae bloom* di perairan (Mahlil et al., 2018; Matthews, 2008)

Dalam rangka pengendalian pencemaran air, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (LHK) mengesahkan Peraturan Menteri LHK No. 68 tahun 2016 tentang baku mutu air limbah yang mengatur batasan maksimal konsentrasi pencemar yang diijinkan untuk dibuang ke lingkungan. Untuk memenuhi standar kualitas air limbah yang telah ditetapkan, berbagai metode, strategi, dan konfigurasi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) baik secara individu, komunal maupun terpusat telah diterapkan. Diantara dua proses utama dalam IPAL, aerobik dan anaerobik, proses anaerobik lebih disukai untuk diterapkan pada IPAL komunal. Hal ini dapat dikarenakan konsumsi energi pada proses anaerobik lebih rendah dibandingkan dengan proses aerobik dimana pada proses aerobik membutuhkan energi untuk aerasi. Sedangkan pada IPAL terpusat di Sewon, Bantul menggunakan proses aerasi pada

kolam fakultatif. Dari studi terdahulu yang sudah dilakukan (Ahmad et al., 2017, 2019), penghematan energi di IPAL dapat dilakukan salah satunya dengan strategi *intermittent aeration* dibandingkan dengan aerasi secara menerus (24 jam) dikarenakan pada *intermittent aeration* terdapat periode dimana aerasi tidak dilakukan sehingga penggunaan total energi dapat lebih rendah.

Hingga saat ini, belum dapat diketahui secara pasti kinerja, stabilitas dan reliabilitas dari berbagai macam IPAL yang ada. Hal ini dikarenakan pemantauan kualitas air secara rutin belum dapat terlaksana dengan baik, terutama pada IPAL skala kecil hingga menengah. Berbeda dengan IPAL skala besar atau IPAL untuk kegiatan komersial, seperti hotel dan pusat perbelanjaan, yang dikenakan kewajiban untuk melakukan pengujian kualitas air efluen dan melaporkan secara berkala kepada Badan/Dinas Lingkungan Hidup setempat.

Pemanfaatan *microbubble generator* (MBG) *nozzle* sebagai alat aerasi pada IPAL merupakan terobosan baru pada perkembangan teknologi aerasi. MBG *nozzle* pada umumnya dipasang pada *discharge* pompa. Hal tersebut merupakan keunggulan yang mengakibatkan MBG memiliki dua fungsi yang dapat bekerja bersamaan yaitu sebagai resirkulasi air limbah dan sekaligus dapat mensuplai oksigen untuk kebutuhan aerasi. Dari studi sebelumnya, diketahui bahwa koefisien transfer massa oksigen dengan MBG lebih tinggi dari aerator tipe lain karena ukuran gelembung udara yang dihasilkan lebih kecil (skala mikron) (Shalindry et al., 2015).

Bulaksumur *Residence* adalah asrama mahasiswa Universitas Gadjah Mada yang menggunakan IPAL dengan kombinasi antara strategi aerasi dan secara spesifik menggunakan *intermittent aeration* dan MBG dengan resirkulasi air limbah. IPAL tersebut

secara spesifik menggunakan MBG untuk aerasi dan tidak ada jenis aerator lain yang terpasang di dalamnya selama operasional. Se jauh penelusuran pustaka yang telah dilakukan oleh penulis, belum ditemukan informasi tentang kinerja, stabilitas dan reliabilitas IPAL dengan sistem aerasi menggunakan MBG dan strategi *intermittent aeration*. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan dan penyempurnaan teknologi MBG dan strategi aerasi yang tepat untuk menghasilkan IPAL dengan kinerja yang stabil dan reliabilitas yang baik.

METODE PENELITIAN

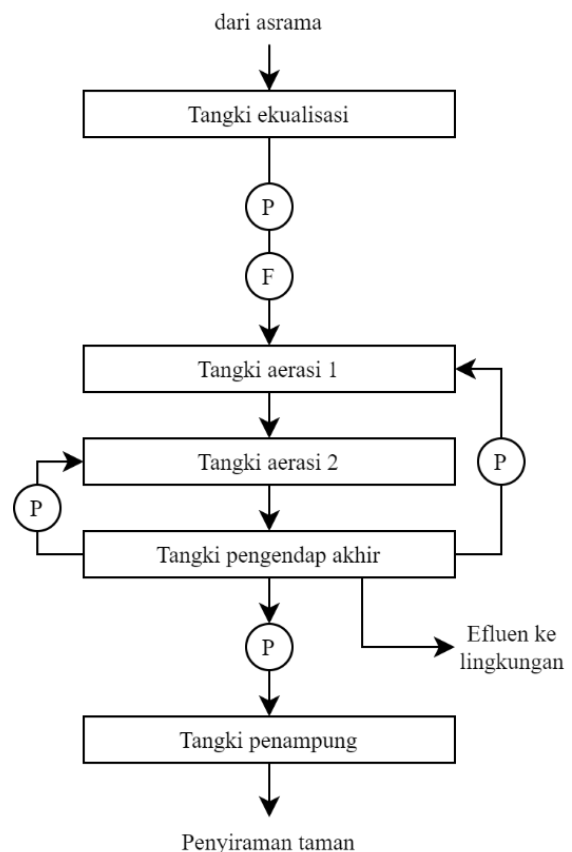
Konfigurasi IPAL

Lokasi IPAL terletak di Asrama Mahasiswa Ratnaningsih Bulaksumur *Residence* yang melayani 42 kamar dengan penghuni 2 orang per kamar. IPAL hanya mengolah *greywater* dari kamar mandi, dan wastafel setiap kamar dan wastafel dapur umum yang berjumlah satu dapur di setiap lantai. Asrama Ratnaningsih Bulaksumur *Residence* memiliki 4 lantai.

Skema pengolahan air limbah pada IPAL tersaji pada Gambar 1. Air limbah yang dihasilkan dari gedung asrama dialirkan ke sebuah tangki ekualisasi (1.050 l) berjenis tangki timbun. Sebuah pompa celup dengan kapasitas maksimal 115 l/menit (Multipro SP-125-DWMP, 125W, Indonesia) yang dilengkapi dengan *auto level switch*, yang dapat menyalakan dan mematikan pompa sesuai berdasarkan level air di dalam tangki ekualisasi, digunakan untuk mengalirkan air limbah ke tangki aerasi 1. Sebuah *water meter* dipasang pada inlet tangki aerasi 1 untuk mencatat volume air limbah yang masuk ke sistem pengolahan.

Dari tangki aerasi 1 air limbah mengalir secara gravitasi ke tangki aerasi 2 dan tangki pengendap akhir (volume masing-masing 1.050 l). Dari bak pengendap akhir, air limbah

terolah di resirkulasi ke tangki aerasi 1 dan 2 dengan masing-masing pompa sentrifugal dengan debit 21.7 l/menit (Shimizu PS-121 BIT, 125W). *Microbubble generator* (MBG) *nozzle* dipasang pada *inlet* pipa resirkulasi ke masing-masing tangki aerasi 1 dan 2 dengan tujuan pada saat resirkulasi berlangsung, udara akan masuk pada MBG *nozzle* dan ikut masuk bersama air resirkulasi ke tangki aerasi sehingga *blower* tidak lagi diperlukan untuk mensuplai udara pada proses aerasi. Proses resirkulasi (bersamaan dengan aerasi) dilakukan secara *intermittent* (15 menit menyala – 15 menit mati) diatur dengan *auto timer switch*. Selain untuk menghemat penggunaan energi, aerasi secara *intermittent* dilakukan untuk mengakomodasi proses nitrifikasi dan denitrifikasi pada satu tangki yang sama.



Gambar 1. Skema proses pada IPAL: simbol P adalah pompa dan F adalah *flowmeter*

Terdapat dua *outlet* pada tangki pengendap akhir; pertama, *outlet* menuju ke tangki penampungan air olahan yang terdapat

pada lantai 4 gedung asrama dialirkan dengan pompa *semi-jet* dengan kapasitas 44 l/menit (Shimizu JET-100 BIT, 100W, Indonesia). Dari tangki penampung tersebut, air olahan akan digunakan untuk penyiraman kawasan Asrama; kedua, *outlet* menuju selokan. Jika air pada tangki penampung penuh, maka efluen IPAL akan dibuang ke selokan. Seluruh tangki pada IPAL menggunakan tangki *high density polyethylene* (HDPE) dan *power meter* untuk mengukur penggunaan energi listrik dipasang pada setiap pompa.

Pengambilan Sampel dan Uji Kualitas Air

Pengukuran debit dan pengambilan sampel untuk uji kualitas air dilakukan sebanyak dua kali dalam seminggu pada hari Selasa dan Minggu (pada waktu yang sama), untuk merepresentasikan kondisi normal dan kondisi puncak penggunaan air, dari 4 Oktober 2020 hingga 24 Desember 2020. Pengukuran debit dilakukan dengan menghitung selisih volume air pada *water meter* dibagi dengan durasi pengamatan. Pengambilan sampel air limbah dilakukan pada influen dan efluen IPAL. Influen IPAL yang diambil adalah *inlet* tangki aerasi 1 dan efluen IPAL adalah *outlet* tangki bak pengendap akhir. Pada saat pengambilan sampel air juga dilakukan pengukuran konsentrasi oksigen terlarut (DO) pada saat aerasi terjadi (pompa resirkulasi menyala) dan tanpa aerasi (pompa resirkulasi mati) dengan menggunakan *portable DO meter* (Lutron 5512, China)

Parameter kualitas yang diuji adalah *total suspended solids* (TSS), *chemical oxygen demand* (COD), Amonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$), nitrit nitrogen ($\text{NO}_2\text{-N}$) dan nitrat nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$) dan fosfat fosfor ($\text{PO}_4\text{-P}$). Pengujian TSS dilakukan mengikuti metode pada SNI 6989.3-2019 (BSN, 2019a) dan pengujian COD mengikuti metode pada SNI 6989.73-2019 (BSN, 2019b), sedangkan pengujian $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ dan $\text{PO}_4\text{-P}$ menggunakan spektrofotometri dengan

reagent mengikuti *manual book* spektrofotometer (HACH DR2010, USA).

Analisis Data

Kepatuhan terhadap Baku Mutu

Target penggunaan efluen IPAL Bulaksumur adalah untuk penyiraman lahan di sekitar asrama, sedangkan jika sedang tidak terdapat kebutuhan air penyiraman, maka efluen IPAL akan dibuang ke selokan. Oleh karena itu, kualitas efluen IPAL akan dibandingkan dengan Baku Mutu Air Limbah menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 68 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Limbah Domestik dan Baku Mutu Air Kelas IV menurut Peraturan Pemerintah RI No. 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, dimana air kelas IV adalah air yang peruntukannya untuk pengairan, pertanian dan penggunaan lain yang mempersyaratkan kualitas yang sama. Baku Mutu air untuk parameter yang dianalisis tersaji pada Tabel 1.

Tabel 1. Baku Mutu Air Limbah dan Baku Mutu Air Kelas IV

Parameter	Konsentrasi* (mg/l)	Konsentrasi** (mg/l)
TSS	30	400
COD	100	100
$\text{NH}_3\text{-N}$	10	0,5 ¹⁾
$\text{NO}_2\text{-N}$	-	0,06 ¹⁾
$\text{NO}_3\text{-N}$	-	20
$\text{PO}_4\text{-P}$	-	5

*PermenLHK No. 68/2016

**PP No.82/2001

¹⁾Tidak dipersyaratkan pada Baku Mutu Air Kelas IV, sehingga menggunakan Baku Mutu Kelas yang lebih tinggi

Reliabilitas dan stabilitas

Reliabilitas suatu IPAL dilihat dari kemampuan IPAL tersebut untuk menghasilkan efluen yang memenuhi baku mutu yang dipersyaratkan. Jika konsentrasi efluen lebih tinggi dari baku mutu maka dianggap IPAL tersebut gagal. Probabilitas kegagalan IPAL dapat dituliskan secara

matematis seperti dalam Persamaan (1). Reliabilitas (R) (%) didefinisikan sebagai probabilitas IPAL dapat memenuhi baku mutu dan secara matematis seperti dalam Persamaan (2).

$$P_{gagal} = \frac{n_{gagal}}{n_{total}} \times 100 \quad (1)$$

dengan P_{gagal} adalah probabilitas kegagalan (%), n_{gagal} adalah jumlah data yang tidak memenuhi baku mutu dan n_{total} adalah jumlah total data yang diambil.

$$R = 100\% - P_{gagal} \quad (2)$$

Untuk menelaah lebih lanjut stabilitas kinerja dan reliabilitas dari IPAL, maka dilakukan analisis reliabilitas dengan menggunakan data konsentrasi efluen. *Coefficient of reliability* (COR) dihitung dengan Persamaan (3) dan semakin kecil nilai COR merepresentasikan nilai reliabilitas yang lebih baik (Bunce & Graham, 2019; Owusu-Ansah et al., 2015).

$$COR = \sqrt{(y^2+1)} \times \exp[-Z_{1-\alpha}\sqrt{(y^2+1)}] \quad (3)$$

$$Z_{1-\alpha} = \frac{\ln X_s - [\ln m_x - 0,5(y^2+1)]}{\sqrt{\ln(y^2+1)}} \quad (4)$$

Dengan *COR* adalah *coefficient of reliability*, y adalah *relative standard deviation* (RSD), $Z_{1-\alpha}$ adalah *standardized normal variate* (Niku et al., 1979), m_x adalah rerata konsentrasi efluen (mg/l) dan X_s adalah baku mutu efluen (mg/l).

Removal efficiency

Removal efficiency untuk TSS, COD dan $PO_4\text{-P}$ dihitung dengan Persamaan (5).

$$Removal = 100 \times \frac{(C_{in} - C_{eff})}{C_{in}} \quad (5)$$

Dengan *Removal* adalah *removal efficiency* (%), C_{in} dan C_{eff} masing-masing adalah konsentrasi influen dan efluen (mg/l).

Efisiensi nitritasi, nitratasi, nitrifikasi dan denitrifikasi

Proses nitrifikasi terjadi dalam dua tahap yaitu nitritasi dan nitratasi. Nitritasi adalah konversi amonia menjadi nitrit oleh bakteri *ammonia oxidizing bacteria* (AOB), sehingga efisiensi nitritasi dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara amonia yang terkonversi dengan konsentrasi awal amonia. Secara matematis, efisiensi nitritasi (%) dapat dituliskan seperti dalam Persamaan (6).

$$Nitritasi = 100 \times \frac{(TAN_{in} - TAN_{eff})}{TAN_{in}} \quad (6)$$

dengan TAN adalah konsentrasi total $NH_3\text{-N}$ (mg/l) dan indeks *in* dan *eff* masing-masing menyatakan influen dan efluen.

Nitratasi adalah proses konversi nitrit menjadi nitrat, sehingga efisiensi nitratasi dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara konsentrasi nitrit yang terkonversi dengan konsentrasi awal nitrit. Konsentrasi awal nitrit adalah jumlah dari konsentrasi amonia yang terkonversi dan konsentrasi nitrit di influen sedangkan konsentrasi nitrit yang terkonversi menjadi nitrat dapat didefinisikan sebagai selisih antara konsentrasi awal nitrit dengan dengan konsentrasi nitrit di efluen. Secara matematis, efisiensi nitratasi (%) dapat dituliskan seperti dalam Persamaan (7).

$$Nitratasi = 100 \times 1 - \frac{Nitrit_{eff}}{TAN_{in} - TAN_{eff} + Nitrit_{in}} \quad (7)$$

dengan *Nitrit* adalah konsentrasi $NO_2\text{-N}$ (mg/l) dan indeks *in* dan *eff* menyatakan influen dan efluen.

Denitrifikasi dapat didefinisikan sebagai proses konversi dari seluruh bentuk teroksidasi nitrogen (NO_x) ($NO_2\text{-N}$ dan $NO_3\text{-N}$) menjadi N_2 (von Sperling et al., 2020), dan secara matematis, efisiensi denitrifikasi (%) dapat dituliskan seperti dalam Persamaan (8).

$$Denitrifikasi = 100 \times 1 - \frac{NOx_{eff}}{TAN_{in} - TAN_{eff}} \quad (8)$$

dengan NOx_{eff} adalah jumlah konsentrasi $NO_2\text{-N}$ dan $NO_3\text{-N}$ di efluen (mg/l).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik influen

Dari hasil wawancara dengan pengelola Bulaksumur *Residence*, diperoleh informasi bahwa IPAL dibangun pada Januari 2020 dan mulai beroperasi pada Februari 2020 dengan kapasitas rencana 8 m³/hari. Namun, dikarenakan kondisi pandemi COVID-19 dan dikeluarkannya kebijakan kuliah secara daring, banyak dari penghuni asrama yang kembali ke daerah asal sehingga jumlah aktual penghuni hanya sedikit. Pada saat pelaksanaan pengamatan kinerja IPAL, kamar di Bulaksumur *Residence* juga belum terisi penuh. Hal tersebut berdampak kepada debit air limbah pada IPAL menjadi sangat kecil dibandingkan dengan kapasitas rencana yaitu 0,5±0,4 m³/hari dengan *hydraulic residence time* (HRT) sebesar 8,2±9 hari. Selain itu, beban volumetrik IPAL juga rendah. Konsentrasi influen dan data operasional IPAL tersaji dalam Tabel 2.

Karakteristik efluen dan realibilitas IPAL

Ringkasan data kualitas efluen IPAL dan profil konsentrasi efluen selama 82 hari pengamatan masing-masing tersaji pada Tabel 3 dan Gambar 2. Konsentrasi efluen untuk setiap parameter sangat bervariasi. Konsentrasi efluen TSS tidak pernah melebihi 14,4 mg/l dan selalu memenuhi kedua Baku Mutu baik Air Limbah maupun Kualitas Air Kelas IV. Hal yang sama terlihat pada konsentrasi COD dan NH₃-N (dengan masing-masing konsentrasi maksimal 24,0 dan 7,7 mg/l), kedua parameter tersebut selalu memenuhi kedua Baku Mutu. Hasil yang berbeda tampak pada PO₄-P, NO₂-N dan NO₃-N. Selama pengamatan probabilitas ketiga parameter tersebut tidak memenuhi Baku Mutu sebesar 54,2 % untuk PO₄-P, 91,7 % dan 91,7 % untuk NO₂-N dan NO₃-N.

Tabel 2. Karakteristik influen dan data operasional IPAL

Parameter	Nilai		
	Min.	Maks.	Rerata
Konsentrasi influen, mg/l			
TSS	6,0	49,4	15,5±10,4
COD	21,4	136,0	66,2±26,6
PO ₄ -P	6,3	17,6	9,9±2,7
NH ₃ -N	4,1	38,0	14,6±8,4
NO ₂ -N	0,01	0,05	0,01±0,01
NO ₃ -N	1,2	2,8	2,0±0,4
Konsentrasi DO, mg/l			
R1-aerasi on	1,1	3,8	1,9±0,6
R1-aerasi off	0,0	2,1	1,4±0,5
R2-aerasi on	2,0	4,3	3,0±0,6
R2-aerasi off	0,0	3,6	2,4±0,8
Parameter lain			
Debit, m ³	0,1	1,2	0,5±0,4
HRT, hari	1,7	32,7	8,2±9
C/N ratio	1,3	11,6	4,7±2,6
Beban volumetrik, g-COD/hari/m ³	1,0	43,7	17,7±13,8

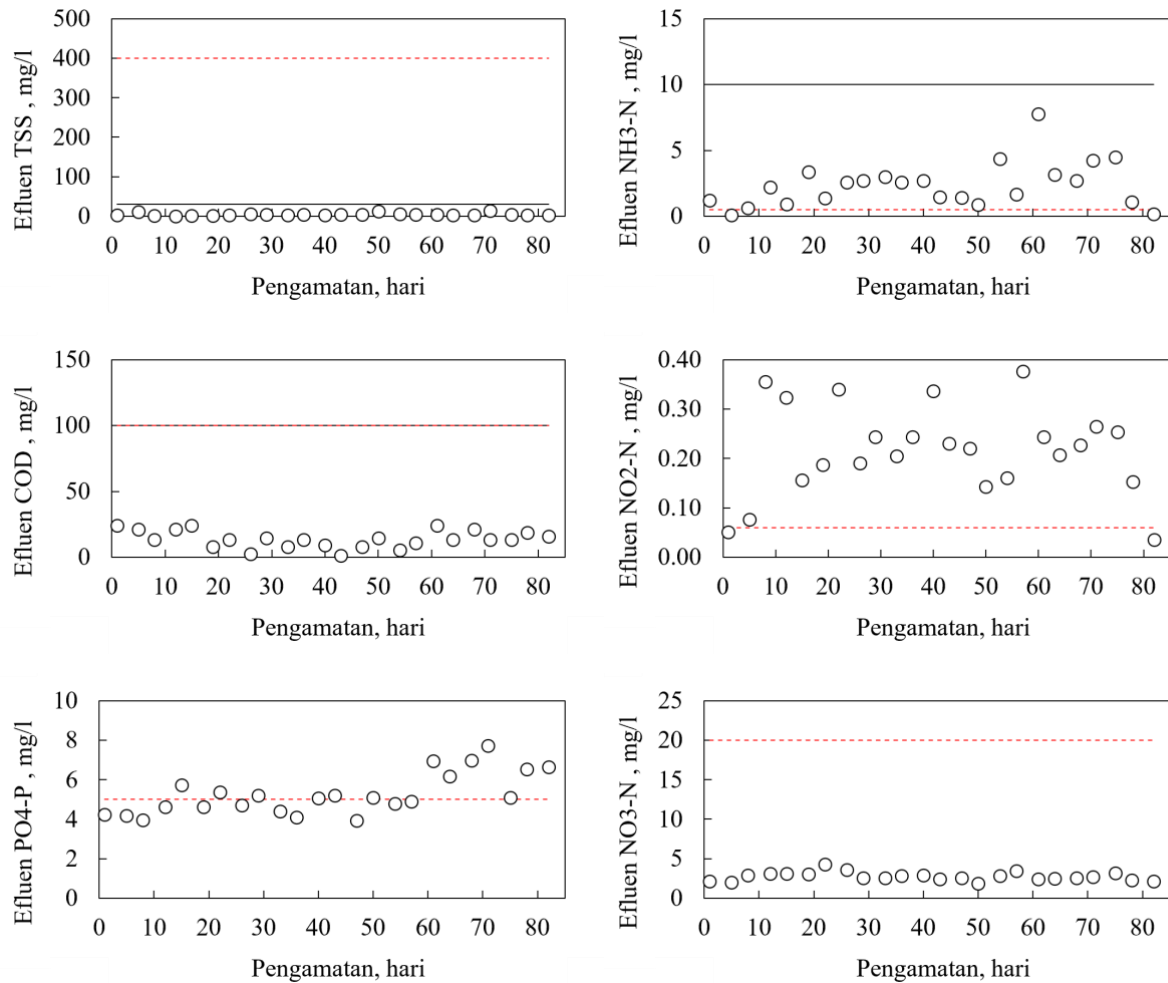
Tabel 3. Konsentrasi efluen dan realibilitas IPAL

	Konsentrasi, mg/l			
	Min.	Maks.	Rerata	
TSS	0,3	14,4	4,6±3,4	
COD	1,3	24,0	13,9±6,6	
PO ₄ -P	3,9	7,7	5,3±1,1	
NH ₃ -N	0,1	7,8	2,4±2,4	
NO ₂ -N	0,04	0,38	0,22±0,99	
NO ₃ -N	1,9	4,3	2,8±0,5	
	BM* air limbah		BM* air kelas IV	
	R, %	COR	R, %	COR
TSS	100	0,2	100	0,0
COD	100	0,8	100	0,1
PO ₄ -P	-**	-	45,8	1,1
NH ₃ -N	100	0,7	8,3	4,7
NO ₂ -N	-**	-	8,3	3,6
NO ₃ -N	-**	-	100	0,1

*BM adalah Baku Mutu

**tidak dipersyaratkan

Dari Tabel 3, terlihat bahwa realibilitas IPAL sangat baik (100%) untuk memenuhi Baku Mutu Air Limbah. Hal tersebut



Gambar 2. Profil konsentrasi IPAL. Garis penuh hitam menunjukkan baku mutu air limbah dan garis merah terputus menunjukkan baku mutu air kelas IV

menunjukkan bahwa untuk parameter yang diamati, efluen IPAL aman jika langsung dibuang ke lingkungan. Akan tetapi, jika efluen IPAL akan digunakan sebagai air penyiraman taman, reliabilitas untuk $\text{PO}_4\text{-P}$ hanya 45,8% dan reliabilitas yang lebih buruk terdapat pada $\text{NH}_3\text{-N}$ dan $\text{NO}_2\text{-N}$ dengan reliabilitas sebesar 8,3%. Terlihat hubungan kontradiktif antara nilai reliabilitas dengan COR. Jika pada kedua standar Baku Mutu, semakin besar nilai COR maka reliabilitas akan menurun dan sebaliknya. Menurut Owusu-Ansah et al. (2015) dan Bunce & Graham (2019), semakin tinggi reliabilitas IPAL, maka semakin kecil COR, hal tersebut juga sejalan dengan hasil penelitian ini. Selain itu teramati pula reliabilitas IPAL <50% ditemukan untuk nilai $\text{COR} > 1$. Dari Persamaan (3) dan (4), nilai COR dipengaruhi

dari konsentrasi rerata efluen (m_x) dan stabilitas konsentrasi efluen, dalam hal ini dinyatakan dalam RSD (y) dimana semakin stabil efluen maka nilai y akan semakin kecil. IPAL yang baik akan menghasilkan nilai konsentrasi efluen rerata yang lebih rendah dari baku mutu ($m_x < X_s$) dan konsentrasi efluen yang stabil (nilai y semakin kecil), sehingga jika diaplikasikan untuk menghitung COR, IPAL yang stabil dan reliabel akan memberikan COR yang rendah. Meskipun terdapat variasi pada konsentrasi efluen dan reliabilitas yang rendah untuk memenuhi standar Baku Mutu Air Kelas IV, kinerja IPAL dalam hal *removal efficiency* tampak stabil (Tabel 4). *Relative standard deviation* (RSD) digunakan sebagai indikator kestabilan kinerja. RSD digunakan untuk melihat tingkat presisi suatu data. Semakin kecil RSD, maka

data tersebut semakin presisi dan nilai RSD < 30% masih dapat ditolerir sebagai nilai cukup presisi (Eurachem, 2014). Dengan mengelaborasi teori statistik tersebut pada penelitian ini, maka dapat dinyatakan semakin kecil RSD maka proses tersebut semakin stabil. Seluruh nilai RSD pada kinerja IPAL (*removal efficiency* dan nitritasi, nitrifikasi dan denitrifikasi) lebih kecil dari 30 %. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja IPAL dapat dikategorikan sebagai cukup stabil. TN removal dan efisiensi denitrifikasi menunjukkan stabilitas yang cukup ($20\% < \text{RSD} < 30\%$), kemudian TSS, COD dan $\text{PO}_4\text{-P}$ removal menunjukkan stabilitas yang baik ($10\% < \text{RSD} < 20\%$), terlebih lagi stabilitas yang sangat baik terlihat pada efisiensi nitritasi dan nitrifikasi ($\text{RSD} < 10\%$). Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, realibilitas efluen $\text{NH}_3\text{-N}$ dan $\text{NO}_2\text{-N}$ sangat rendah untuk memenuhi standar Baku Mutu Air Kelas IV. Besarnya efluen $\text{NH}_3\text{-N}$ lebih dipengaruhi oleh proses nitrifikasi (nitritasi dan nitrifikasi) dimana proses nitritasi lebih dominan dalam menentukan konsentrasi efluen $\text{NH}_3\text{-N}$ karena pada tahap ini $\text{NH}_3\text{-N}$ dikonversi menjadi $\text{NO}_2\text{-N}$. Meskipun efisiensi $\text{NH}_3\text{-N}$ maksimal mencapai 99,5%, namun nilai rerata nya hanya sebesar $83,1 \pm 7,9\%$.

Dari studi terdahulu yang sudah dilakukan (Ardhito, 2019) pada IPAL dengan teknologi MBG dengan *intermittent aeration* (1 jam aerasi mati dan 3 jam aerasi menyala, konsentrasi DO saat aerasi menyala 5,9 – 6,3 mg/l), dengan COD loading 923 g/m³/hari dengan C/N ratio 7,5, meskipun waktu aerasi yang dilakukan lebih panjang dan konsentrasi DO pada saat aerasi lebih tinggi tetapi diperoleh efisiensi nitritasi ($77,8 \pm 4,4\%$) nitrifikasi ($87,3 \pm 0,1\%$) yang lebih rendah dari penelitian ini. Sehingga waktu aerasi yang rendah pada penelitian ini (15 menit) dianggap bukan merupakan faktor yang mempengaruhi efisiensi nitritasi dan nitrifikasi. Nitrifikasi parsial yang ditandai dengan tingginya

efisiensi nitrifikasi (>90%) dan denitrifikasi (>75%) dapat terjadi pada konsentrasi DO yang rendah (<1,2 mg/l) (Capodaglio et al., 2016), namun hal tersebut tidak terjadi pada IPAL Bulaksumur *Residence*. Pada penelitian ini, konsentrasi DO saat aerasi berlangsung baik pada tangki aerasi 1 ($1,9 \pm 0,6$ mg/l) maupun pada tangki aerasi 2 ($3,0 \pm 0,6$ mg/l). Selain itu, rendahnya beban volumetrik IPAL dan C/N ratio dapat berkontribusi pada menurunnya COD *removal* dan efisiensi nitritasi. Pada nilai C/N < 10 efisiensi nitritasi dan nitrifikasi akan proporsional dengan C/N ratio dan akan berbanding terbalik pada C/N ratio > 10 (Roy et al., 2010).

Tabel 4. Kinerja IPAL

Parameter	Nilai	
	Rerata	RSD
TSS <i>removal</i>	$68,9 \pm 12,9\%$	18,7%
COD <i>removal</i>	$78,4 \pm 9,8\%$	12,5%
$\text{PO}_4\text{-P}$ <i>removal</i>	$45,3 \pm 8,6\%$	19,0%
Nitritasi	$83,1 \pm 7,9\%$	9,5%
Nitrifikasi	$97,6 \pm 2,0\%$	2,0%
Denitrifikasi	$67,2 \pm 19,3\%$	28,7%
TN <i>removal</i>	$63,4 \pm 13,7\%$	21,7%

Rendahnya konsentrasi DO dan durasi aerasi diperkirakan menjadi penyebab rendahnya COD *removal* pada penelitian ini ($78,4 \pm 9,8\%$). Dari laporan kinerja IPAL domestik yang terpasang di toilet umum dengan aerasi menggunakan *blower* (Setyapeni et al., 2021), meskipun aerasi dilakukan secara menerus selama 24 jam, tetapi konsentrasi DO rerata yang hanya mencapai kisaran 0,4 – 0,5 mg/l hanya menghasilkan COD *removal* sebesar 54,5 – 73,3%. Didapatkan informasi dari pengelola IPAL bahwa sejak pertama kali dioperasikan, belum pernah dilaksanakan perawatan pembersihan MBG, hal tersebut diduga dapat memberikan kontribusi terhadap menurunnya efisiensi transfer oksigen yang ditandai dengan rendahnya konsentrasi DO di tangki aerasi.

Pada umumnya, semakin tinggi efisiensi nitrifikasi maka akumulasi $\text{NO}_2\text{-N}$ semakin rendah karena $\text{NO}_2\text{-N}$ terkonversi menjadi

NO₃-N. Namun pada pengamatan terlihat hal yang sebaliknya. Walaupun efisiensi nitrifikasi tinggi dan stabil ($97,6 \pm 2,0\%$, RSD 2,0%), reliabilitas efluen NO₂-N untuk memenuhi standar Baku Mutu Air Kelas IV masih sangat rendah (8,3%). Perlu penelitian lebih lanjut untuk mengetahui secara pasti penyebab hal tersebut.

Pada penelitian ini, total nitrogen (TN) didefinisikan sebagai jumlah NH₃-N, NO₂-N dan NO₃-N. Dari Tabel 4 tampak TN *removal efficiency* lebih dipengaruhi oleh proses denitrifikasi. Konsentrasi DO berpengaruh pada proses denitrifikasi dimana proses denitrifikasi terjadi pada kondisi anoksik atau anaerobik. Efisiensi denitrifikasi sebesar 64,8% dan 77,0% tercapai pada konsentrasi DO masing-masing sebesar 0,45 dan 0,28 mg/l (Viotti et al., 2016). Pada IPAL Bulaksumur *Residence* teramati bahwa efisiensi denitrifikasi sebesar $67,2 \pm 19,3\%$ (pada konsentrasi DO saat tanpa aerasi sebesar $1,4 \pm 0,5$ dan $2,4 \pm 0,8$ mg/l pada tangki aerasi 1 dan 2) dapat tercapai dan 100% reliabilitas efluen NO₃-N untuk memenuhi standar Baku Mutu Air Kelas IV. Hal tersebut merupakan capaian yang baik karena proses nitrifikasi dan denitrifikasi dapat berlangsung pada satu reaktor yang sama dan membuktikan keberhasilan strategi aerasi secara *intermittent*.

KESIMPULAN

IPAL *Bulaksumur Residence* dibangun secara khusus memanfaatkan MBG untuk proses aerasi dengan memanfaatkan resirkulasi efluen dan mengaplikasikan strategi aerasi secara *intermittent*. Pada saat dilakukan evaluasi, IPAL sudah beroperasi selama kurang lebih 200 hari tanpa dilakukan evaluasi dan perawatan atau pembersihan sampai dengan evaluasi dilakukan selama 82 hari pengamatan. Meskipun demikian, dapat tercapai performa yang baik ditandai dengan *removal* TSS, COD, PO₄-P dan TN (masing-masing sebesar $68,9 \pm 12,9\%$, $78,4 \pm 9,8\%$, $45,3 \pm 8,6\%$ dan $63,4 \pm 13,7\%$) serta reliabilitas

yang tinggi (100%) untuk memenuhi standar Baku Mutu Air Limbah Domestik yang dipersyaratkan pada PermenLHK No. 68 tahun 2016. Jika efluen IPAL akan digunakan sebagai air penyiraman taman (untuk memenuhi kriteria Baku Mutu Air Kelas IV PP No.82 tahun 2001), maka diperlukan perhatian khusus untuk memperbaiki kinerja *nutrient removal* karena reliabilitas untuk efluen PO₄-P, NH₃-N dan NO₂-N yang masih rendah (masing-masing sebesar 45,8%, 8,3% dan 8,3%). Perawatan secara rutin perlu dilakukan terutama pada pembersihan MBG secara berkala untuk mendapatkan efisiensi transfer oksigen selalu terjaga pada kondisi terbaik sesuai dengan desainnya.

Secara umum, kombinasi antara aerasi menggunakan MBG dan strategi aerasi secara *intermittent* (15 menit aerasi menyala dan 15 menit aerasi mati) berhasil menunjukkan *removal efficiency* TSS, COD, PO₄-P dan TN yang baik serta efisiensi nitrifikasi, nitrifikasi dan denitrifikasi yang baik pula. Hasil penelitian ini diharapkan mampu memberikan informasi penting yang dapat dipergunakan sebagai dasar penyempurnaan proses aerasi menggunakan MBG dan optimasi strategi aerasi untuk menghasilkan kinerja dan reliabilitas yang lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Perencanaan Universitas Gadjah Mada dan Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada atas dukungan dana untuk pelaksanaan seluruh kegiatan penelitian ini.

REFERENSI

- Ahmad, J. S. M., Cai, W., Zhao, Z., Zhang, Z., Shimizu, K., Lei, Z., & Lee, D.-J. 2017. Stability of algal-bacterial granules in continuous-flow reactors to treat varying strength domestic wastewater. *Bioresource Technology*. 244(June): 225–233.

- <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.134>
- Ahmad, J. S. M., Zhao, Z., Zhang, Z., Shimizu, K., Utsumi, M., Lei, Z., Lee, D.-J., & Tay, J. H. 2019. Algal-bacterial aerobic granule based continuous-flow reactor with effluent recirculation instead of air bubbling: Stability and energy consumption analysis. *Bioresource Technology Reports*. 7, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100215>
- Ardhito, M. M. 2019. *Perancangan Dan Evaluasi Start-Up Instalasi Pengolahan Air Limbah (Ipal) Kamar Mandi Umum Wisdom Park Ugm Dengan on-Off Aeration Tank Untuk Menurunkan Kadar Nitrogen*. http://etd.repository.ugm.ac.id/home/detail_pencarian/172414
- Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2019. *SNI 6989.3:2019. Air dan air limbah Bagian 3: Cara uji padatan tersuspensi total (Total Suspended Solid/TSS) secara gravimetri*.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2019. *SNI 6989.73:2019. Air dan air limbah - Bagian 73: Cara uji kebutuhan oksigen kimiawi (Chemical Oxygen Demand/COD) dengan refluks tertutup secara titimetri*.
- Bunce, J. T., & Graham, D. W. 2019. A Simple Approach to Predicting the Reliability of Small Wastewater Treatment Plants. *Water*. 11(2397): 1–14. <https://doi.org/10.2166/wst.1990.0174>
- Capodaglio, A. G., Hlavinek, P., & Raboni, M. 2016. Advances in wastewater nitrogen removal by biological processes: state of the art review. *Revista Ambiente e Agua*, 11(2): 250–267. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Eurachem. 2014. The Fitness for Purpose of Analytical Methods. In *Eurachem Guide*, ISBN: 0-94948926-12-0. <http://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/valid.pdf>
- Mahlil, T., Inoue, T., Matsumoto, Y., Aoki, S., Shigeru, K., Yokota, K., Rasul, E., & Makoto, S. 2018. Effect of nutrient inputs on water quality change and phytoplankton growth in Atsumi Bay. *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 50(4): 548–565.
- Matthews, J. A. 2008. Nutrients: Phosphorus, nitrogen source, impact on water quality. *Water Quality/Impaired Waters*. 3(22). <https://doi.org/10.4135/9781446247501.n2679>
- Niemi, A., Edlmann, K., Carrera, J., Juhlin, C., Tatomir, A., Ghergut, I., Sauter, M., Bensabat, J., Fagerlund, F., Cornet, F. H., Vilarrasa, V., & McDermott, C. I. 2006. Waste characterization. In *Industrial Waste Treatment Handbook* (2nd ed., pp. 83–126). https://doi.org/10.1007/978-94-024-0996-3_7.
- Niku, S., Schroeder, E. D., Samaniego, F. J., D, E., & Samaniego, J. 1979. Performance sludge processes of activated and design reliability-based. *Water*. 51(12): 2841–2857.
- Owusu-Ansah, E. D. G. J., Sampson, A., Amponsah, S. K., Abaidoo, R. C., & Hald, T. 2015. Performance, compliance and reliability of Waste stabilization pond: Effluent discharge quality and environmental protection agency standards in Ghana. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 10(11): 1293–1302. <https://doi.org/10.19026/rjaset.10.1825>
- Putro, S. S. 2017. the Study of Water Quantity and Quality (Case Study: Gajahwong Watershed). *Journal of the Civil Engineering Forum*. 2(3): 261. <https://doi.org/10.22146/jcef.26588>
- Rompas, T. M., Rotinsulu, W. C., & Polii, J. V. B. 2019. Analisis Kandungan E-Coli Dan Total Coliform Kualitas Air Baku Dan Air Bersih Pam Manado Dalam Menunjang Kota Manado Yang Berwawasan Lingkungan. *Cocos*. 1(5).
- Roy, D., Hassan, K., & Boopathy, R. 2010.

- Effect of carbon to nitrogen (C:N) ratio on nitrogen removal from shrimp production waste water using sequencing batch reactor. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 37(10): 1105–1110.
<https://doi.org/10.1007/s10295-010-0869-4>
- Saraswati, S. P., Ardion, M. V., Widodo, Y. H., & Hadisusanto, S. 2019. Water Quality Index Performance for River Pollution Control Based on Better Ecological Point of View (A Case Study in Code, Winongo, Gadjah Wong Streams). *Journal of the Civil Engineering Forum*. 5(1): 47.
<https://doi.org/10.22146/jcef.41165>
- Setyapeni, O. Y., Saraswati, S. P., & Ahmad, J. S. M. 2021. Perancangan dan evaluasi kinerja sistem lumpur aktif di IPAL toilet Wisdom Park UGM dalam mengurangi kadar COD dan nitrogen. *Prosiding Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur Abad Ke-21*. 586–591.
<https://s.id/ProsidingSNTI>
- Shalindry, R. O., Rochmadi, & Budhijanto, W. 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>
- Viotti, P., Collivignarelli, M. C., Martorelli, E., & Raboni, M. 2016. Oxygen control and improved denitrification efficiency by dosing ferrous ions in the anoxic reactor. *Desalination and Water Treatment*. 57(39): 18240–18247.
<https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1089200>
- von Sperling, M., Verbyla, M. E., & Oliveira, S. M. A. C. 2020. *Assessment of Treatment Plant Performance and Water Quality Data: A Guide for Students, Researchers and Practitioners*, First ed. IWA Publishing.
<https://doi.org/10.2166/9781780409320>