

Pengolahan Limbah Domestik Menggunakan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dengan Proses Aerobik-Anoksik untuk Menurunkan Nitrogen

Ana Anisa dan Welly Herumurti

Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: anaanissa21@gmail.com

Abstrak—Limbah domestik memiliki kandungan organik, ammonium, nitrat yang tinggi dan dapat menyebabkan pencemaran jika langsung dibuang ke badan air. Sehingga diperlukan pengolahan terhadap limbah agar memenuhi kualitas baku mutu yang berlaku. Salah satu pengolahan limbah adalah dengan melalui proses pengolahan biologis yang dilakukan dengan memanfaatkan mikroorganisme untuk mendegradasi polutan. Salah satu unit pengolahan secara biologis yang sudah umum digunakan adalah *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR). Media biofilm yang digunakan dalam penelitian ini adalah media kaldness (K1). Dalam pelaksanaan penelitian ini, digunakan limbah yang berasal dari unit ABR Jurusan Teknik Lingkungan ITS dengan variasi konsentrasi COD sesuai dengan konsentrasi yang berasal dari inlet dan outlet unit ABR guna menguji kemampuan MBBR dalam mengolah limbah domestik dengan beban organik yang berbeda-beda. Variasi konsentrasi COD yang digunakan adalah konsentrasi *low* (130 – 170) mg/L ; konsentrasi *medium* (270 – 310) mg/L dan konsentrasi *high* (370 – 460) mg/L. Selama berlangsungnya penelitian, unit ini dijalankan dengan durasi proses aerobik-anoksik yang berbeda pada masing-masing reaktor dengan tujuan menentukan waktu durasi pengolahan aerobik dan anoksik yang paling optimal. Reaktor terbuat dari pipa PVC dengan volume pengolahan sebanyak 5 L. Parameter yang digunakan adalah COD, ammonium-nitrogen, nitrat-nitrogen, nitrit-nitrogen, BOD, pH, DO, MLSS, MLVSS. Berdasarkan hasil analisis terlihat bahwa MBBR dengan media kaldness mampu menurunkan kandungan organik sebesar 81,4%; BOD sebesar 83,6%; ammonium-nitrogen sebesar 92,8%; nitrat-nitrogen sebesar 66,4% dan nitrit-nitrogen sebesar 99,7%. Selain itu, durasi pengolahan limbah dengan hasil optimum dicapai pada reaktor dengan durasi pengolahan aerobik selama 31,5 jam dan anoksik selama 13,5 jam.

Kata Kunci—amonium, COD, Limbah Domestik, *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR), Nitrat.

I. PENDAHULUAN

PERTUMBUHAN penduduk yang terus meningkat setiap tahun akan berbanding lurus dengan kegiatan manusia setiap harinya. Meningkatnya kegiatan manusia tersebut akan menyebabkan dampak positif dan dampak negative terhadap lingkungan. Salah satu dampak negatif yang ditimbulkan adalah bertambahnya jumlah limbah yang dihasilkan, dalam penelitian ini limbah yang akan menjadi bahan uji berupa limbah cair domestik. Limbah domestik cenderung memiliki kandungan senyawa organik dan nitrogen tinggi, yang apabila tidak di olah akan menyebabkan pencemaran terhadap badan air penerima [1]. Jenis nitrogen anorganik yang utama dalam air adalah nitrat-nitrogen (NO₃-N), ammonium-nitrogen (NH₃-N) dan nitrit-

nitrogen (NO₂-N). Nitrit merupakan bentuk peralihan dari ammonium menjadi nitrat yang disebut dengan nitrifikasi sedangkan peralihan dari bentuk nitrit menjadi gas nitrogen disebut denitrifikasi. Nitrifikasi berlangsung pada kondisi aerobik dan denitrifikasi berlangsung pada kondisi anoksik [2].

Konsentrasi senyawa nitrogen yang tinggi akan menyebabkan masalah bagi badan air, salah satunya adalah dapat menurunkan kandungan *Dissolved Oxygen*, memicu terjadinya eutrofikasi dan meningkatkan kadar toksisitas suatu badan air [3]. Oleh karena itu perlunya pengolahan yang tepat terhadap limbah domestik sebelum dibuang ke badan air. Jenis pengolahan yang banyak dikembangkan adalah pengolahan secara biologis yaitu dengan memanfaatkan mikroorganisme untuk mendegradasi senyawa organik serta untuk menurunkan kandungan nitrogen didalam air limbah. *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) merupakan salah satu unit pengolahan biologis yang memanfaatkan *biofilm* yaitu dengan sistem *fluidized attached growth* (mikroorganisme yang tumbuh dan berkembangbiak pada media) [4]. Selama proses pengolahan berlangsung, MBBR memanfaatkan proses aerobik- anoksik yang berpotensi untuk menurunkan kandungan nitrogen melalui proses nitrifikasi dan denitrifikasi. Efisiensi removal nitrogen pada limbah domestik melalui proses aerobik-anoksik mencapai 65-70% [3]. Pada penelitian lain menambahkan bahwa efisiensi removal nitrogen dapat mencapai 80,9% dan khususnya pada ammonium mencapai 99,72% pada limbah artifisial dengan konsentrasi COD 500 mg/L [5]. Penurunan kandungan nitrogen yang terjadi dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain adalah beban organik limbah yang akan diolah dan waktu durasi pengolahan secara aerobik dan anoksik yang diterapkan. Untuk variasi durasi pengolahan aerobik-anoksik yang paling optimum belum diketahui, oleh karena itu, diperlukan penelitian mengenai pengolahan senyawa organik dan nitrogen secara biologis menggunakan reaktor MBBR.

II. METODE PENELITIAN

A. Persiapan Alat dan Bahan

Sebelum dilakukan penelitian laboratorium terlebih dahulu menyiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan. Alat – alat yang dibutuhkan untuk menunjang jalannya penelitian antara lain pipa PVC 4", aerator, pompa *submersible*, media kaldness (K1), *glassware*, kertas saring dan *vacuum filter*. Sedangkan bahan – bahan yang diperlukan antara lain limbah domestik yang diambil dari unit *Anaerobic Baffle Reactor* (ABR) Departemen Teknik Lingkungan-ITS, lumpur aktif yang berasal dari *Return Activated Sludge*

(RAS) unit *clarifier*- IPLT keputih, reagen-reagen yang diperlukan untuk analisis sampel.

B. Analisis Karakteristik Awal Limbah

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar konsentrasi senyawa organik pada limbah yang akan diolah sehingga ketika penelitian dilakukan dapat memudahkan dalam penentuan variasi konsentrasi yang digunakan. Parameter yang diuji dalam analisis awal ini adalah parameter yang digunakan sebagai parameter utama selama berjalannya penelitian, yaitu COD, amonium, nitrat dan nitrit.

C. Seeding dan Aklimatisasi

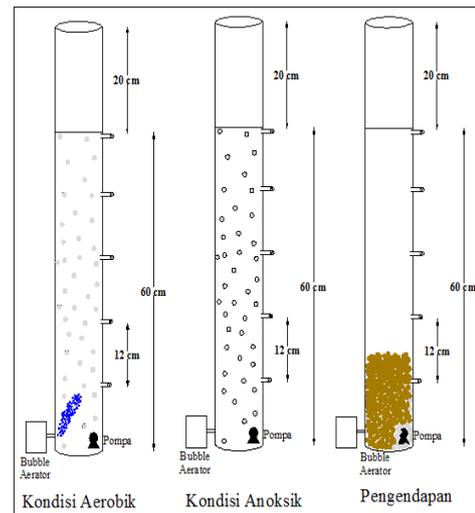
Seeding dilakukan dengan tujuan untuk memperbanyak populasi mikroorganisme dengan menambah lumpur aktif secara *batch* ke dalam reaktor yang telah diisi oleh media *kaldness*. Selama masa *seeding*, dilakukan penambahan gula sebanyak 1 sendok/hari ke dalam lumpur aktif selama 3 hari, lalu lumpur dikondisikan dengan MLSS sebesar 4000 mg/L dan dimasukkan kedalam masing – masing reaktor. Kemudian dilakukan proses aklimatisasi yaitu dengan menambahkan limbah domestik dengan konsentrasi yang berbeda-beda sesuai dengan variasi uji yang dilakukan pada masing-masing reaktor. Volume lumpur yang dimasukkan adalah sebanyak 1 L dan volume limbah yang ditambahkan adalah sebanyak 5 L [6]. Tujuan dilakukannya aklimatisasi adalah untuk mengadaptasikan mikroorganisme dengan kondisi lingkungan yang baru, termasuk sumber makanannya. Pertumbuhan bakteri ditandai dengan perubahan warna suspensi menjadi coklat kehitaman dan terjadi peningkatan nilai MLVSS [7]. Ketika lumpur aktif sudah mencapai kondisi *steady state* maka penelitian sudah bisa dimulai. Kondisi *steady state* yang dimaksud adalah keadaan dimana efisiensi removal COD tidak lebih dari 5% dari efisiensi removal siklus sebelumnya.

D. Pembuatan Reaktor

Reaktor uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah pipa PVC dengan diameter ± 10 cm dan tinggi 100 cm. Volume pengolahan pada reaktor uji adalah sebanyak 5 L. Konsentrasi MLSS yang dibutuhkan di dalamnya adalah sebesar 4000 mg/L. Media yang digunakan adalah media *kaldness* (K1) (Gambar 1) karena media yang baik untuk digunakan dalam unit MBBR adalah media yang tipis dan pergerakan media yang merata. Pada masing – masing reaktor disambung kan dengan aerator yang akan dihidupkan pada saat kondisi aerobik berlangsung serta di dalamnya terdapat pompa *submersible* yang akan dinyalakan ketika durasi anoksik berlangsung (Gambar 2).



Gambar 1. Media *Kaldness* (K1).



Gambar 2. Reaktor Uji.

E. Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dilaksanakan selama ± 54 hari. Selama analisis parameter utama dilakukan dalam 3 durasi waktu aerobik dan anoksik yang berbeda-beda. Pada *running* pertama dilakukan pengolahan dengan waktu durasi proses aerobik selama 31,5 jam-anoksik 13,5 jam; lalu pada *running* selanjutnya dilakukan pengolahan dengan waktu durasi aerobik 22,5 jam-anoksik 22,5 jam dan terakhir adalah pengolahan dengan waktu durasi aerobik selama 13,5 jam-anoksik 31,5 jam. Proses aerobik-anoksik tersebut dilakukan di dalam reaktor yang sama dan siklus tersebut dilakukan berulang sampai pada siklus ketiga. Namun, dalam setiap kali *running*, tiga reaktor disiapkan dengan konsentrasi yang berbeda – beda yang sudah di tentukan sebelumnya. Proses *sampling* untuk analisis COD dan nitrogen dilakukan pada influent awal, fase sebelum aerobik dan fase sebelum anoksik pada masing – masing siklus. Sedangkan untuk uji MLSS *sampling* dilakukan pada saat setelah proses pengendapan.

F. Analisis Data dan Kesimpulan

Pembahasan mengenai hubungan antar satu parameter dengan parameter lain dan sebab akibat hasil analisis yang diperoleh. Kesimpulan disusun berdasarkan analisis data penelitian serta pembahasan. Kesimpulan berisi jawaban atas rumusan masalah dan tujuan yang diharapkan dari adanya penelitian ini. Kesimpulan dibuat menggunakan poin – poin yang dibuat secara ringkas.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Analisis Karakteristik Awal limbah

Analisis karakteristik awal ini bertujuan untuk mengetahui besar konsentrasi senyawa organik dan nitrogen yang sebenarnya dari lumpur aktif (RAS) dan limbah domestik yang akan diolah sehingga dapat ditentukan variasi konsentrasi yang digunakan. Dalam analisis karakteristik awal ini juga dilakukan analisis MLSS dan MLVSS untuk mengetahui konsentrasi padatan tersuspensi yang terkandung di dalam lumpur, sehingga dapat ditentukan volume lumpur yang dibutuhkan di dalam satu reaktor agar sesuai dengan kriteria desain MBBR. Hasil analisis karakteristik awal limbah dan RAS dapat dilihat pada Tabel. 1.

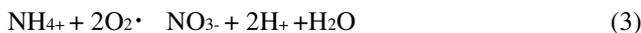
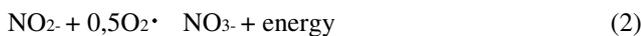
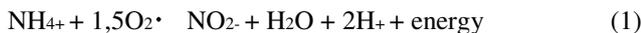
Tabel. 1.

Hasil analisis karakteristik awal limbah dan RAS

No	Parameter	Satuan	Nilai
1	COD inlet	mg/L	454
2	COD outlet	mg/L	246
3	Amonium	mg/L	64.7
4	Nitrat	mg/L	11.2
5	pH	-	7,41 – 7.56
6	Salinitas	ppt	0,38 – 0.39
7	MLSS	mg/L	17.740
8	MLVSS	mg/L	16.680
9	TKN (<i>low</i>)	mg/L	102
10	TKN (<i>high</i>)	mg/L	133

B. Penurunan Senyawa Nitrogen

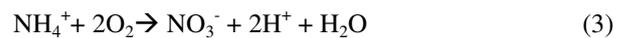
Penyisihan nitrogen terjadi pada proses aerobik maupun anoksik. Proses yang terjadi pada fase aerobik adalah nitrifikasi sedangkan proses yang terjadi pada saat anoksik adalah denitrifikasi. Pada reaktor dengan waktu durasi pengolahan aerobik 31,5 jam menunjukkan hasil efisiensi ammonium-nitrogen yang paling tinggi. Hal ini diindikasikan bahwa proses nitrifikasi berjalan baik dikarenakan ketersediaan oksigen terlarut yang mencukupi untuk bakteri *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* dalam mendegradasi senyawa nitrogen. Reaksi biokimia proses nitrifikasi adalah sebagai berikut:



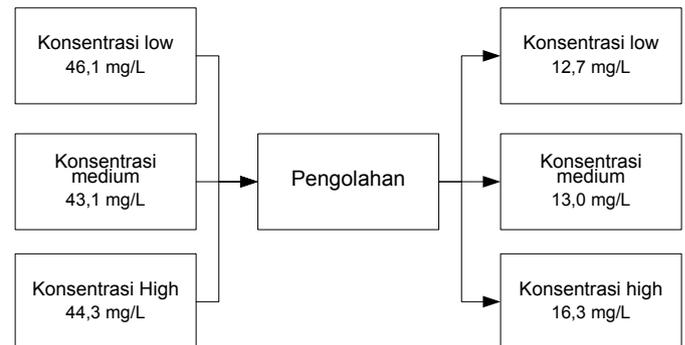
Parameter ammonium-nitrogen diproduksi dengan cara mendegradasi senyawa nitrogen secara biologis. Keberadaan amonium pada proses anoksik/ anaerobik juga menjadi salah satu indikator terjadinya aktivitas mikroorganisme terutama pada proses degradasi senyawa protein. Pada kondisi kurang oksigen proses nitrifikasi akan mengalami gangguan sehingga amonium-nitrogen yang terkandung pada limbah tidak terolah namun justru mengalami peningkatan. Konsentrasi amonium dapat meningkat sejalan dengan kenaikan pH dan temperatur [8]. Hal lain yang mendukung berlangsungnya nitrifikasi adalah kandungan DO di dalam air limbah. Pernyataan tersebut mendukung hasil analisis pada masing – masing durasi waktu pengolahan. Terlihat bahwa setiap hasil analisis pada fase anoksik nilai ammonium naik dari fase sebelumnya. Namun, pada reaktor dengan durasi proses aerobik 22,5 jam dan anoksik 22,5 jam terlihat bahwa pada fase anoksik tiga terjadi penurunan pada konsentrasi ammonium. Hal ini di indikasikan terjadi karena kandungan oksigen terikat pada fase tersebut masa tersedia dalam jumlah banyak sehingga memungkinkan terjadinya proses nitrifikasi.

Penurunan nilai ammonium yang paling optimum terjadi pada reaktor dengan durasi pengolahan aerobik 31,5 jam dan anoksik 13,5 jam. Penurunan terbaik terjadi pada reaktor dengan konsentrasi COD *low* dan konsentrasi COD *high*. Hal ini disebabkan proses nitrifikasi yang terjadi pada reaktor tersebut berlangsung baik dikarenakan durasi aerobik yang lebih lama sehingga mendukung terjadinya proses nitrifikasi. Proses nitrifikasi yaitu pengubahan

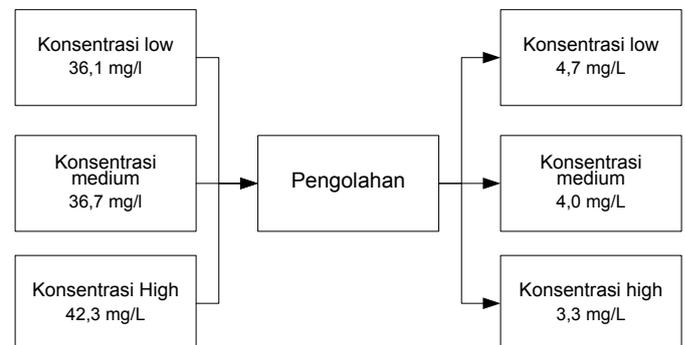
amonium menjadi nitrat dengan melibatkan mikroorganisme dalam kondisi aerobik. Bentuk reaksi total oksidasi yang terjadi pada proses aerobik adalah sebagai berikut:



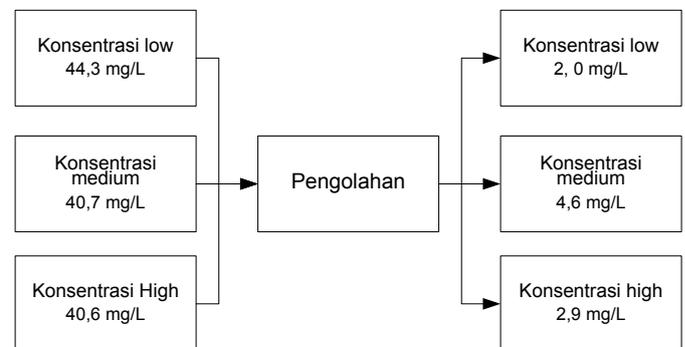
Proses nitrikasi dapat berlangsung secara optimum dalam kondisi aerobik pada kandungan oksigen terlarut >2 mg/L dan pada kondisi pH berkisar antara 7,0 hingga 8,3 [9]. Pada reaktor dengan durasi pengolahan aerobik selama 31,5 jam-anoksik 31,5 jam dapat dilihat bahwa nilai pH selalu mengalami kenaikan pada fase aerobik dan nilai DO yang cukup untuk terjadinya proses nitrifikasi yaitu 3,82 ppm untuk konsentrasi COD *low* dan 3,85 ppm untuk konsentrasi COD *high*. Penyisihan ammonium – nitrogen pada masing-masing durasi pengolahan dapat dilihat pada Gambar 3, Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 3 Removal total ammonium pada durasi pengolahan 13,5 jam aerobik-31,5 jam anoksik



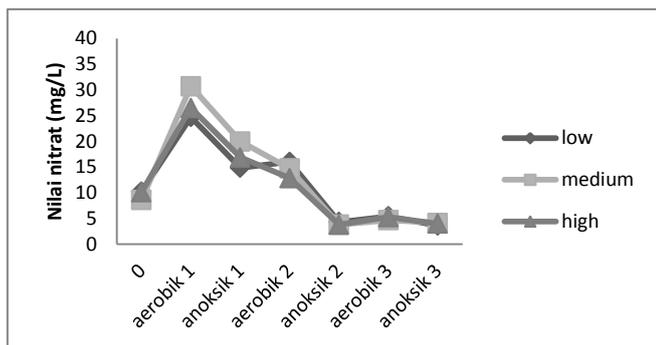
Gambar 4. Removal total ammonium pada durasi pengolahan 22,5 jam aerobik-22,5 jam anoksik.



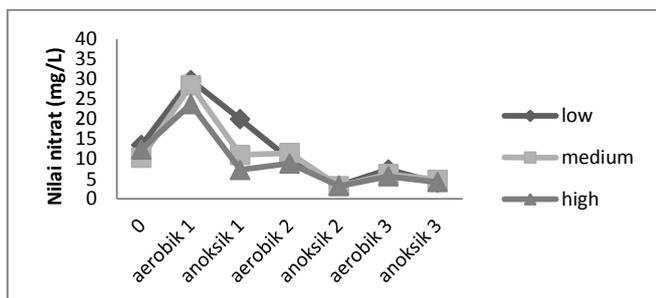
Gambar 5. Removal total ammonium pada durasi pengolahan 31,5 jam aerobik-13,5 jam anoksik.

Pada reaktor – reaktor dengan durasi pengolahan aerobik lebih lama menunjukkan efisien removal yang semakin besar. Hal ini berbanding lurus dengan ketersediaan oksigen yang mencukupi sehingga bakteri *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*

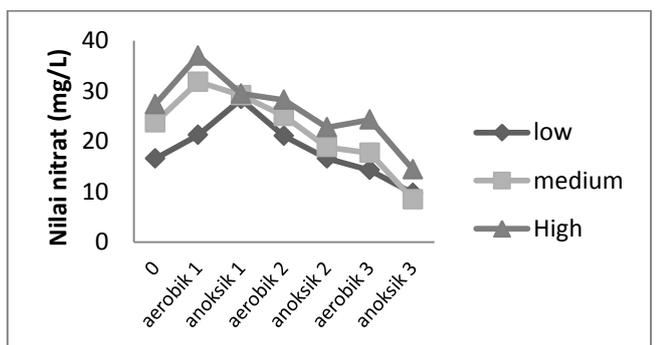
dapat mendegrasi dengan baik. Kemudian hasil perubahan ammonium yang telah menjadi nitrat – nitrogen akan dikonversi menjadi N_2 gas yang dilepas ke atmosfer melalui proses denitrifikasi. Denitrifikasi biologis yang terjadi di dalam reaktor yaitu dengan mengaplikasikan jenis proses denitrifikasi berupa *postanoxic denitrification*. Proses aerobik dilakukan di awal kemudian dilanjutkan dengan proses anoksik. Kondisi aerobik dilakukan untuk mempersiapkan kecukupan oksigen terikat yang dibutuhkan pada proses anoksik. Ketika *postanoxic denitrification* memiliki laju reaksi yang lebih lambat dibandingkan dengan *preanoxic denitrification*. Hal ini dikarenakan proses denitrifikasi yang hanya bergantung pada respirasi *endogeneous* untuk mendapatkan energi [4]. Hasil analisis nitrat-nitrogen selanjutnya dapat dilihat pada Gambar 6; Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 6. Hasil Analisis Nitrat dengan durasi waktu aerobik 13,5 jam dan anoksik 31,5 jam.



Gambar 7. Hasil Analisis Nitrat dengan durasi waktu aerobik 22,5 jam dan anoksik 22,5 jam.

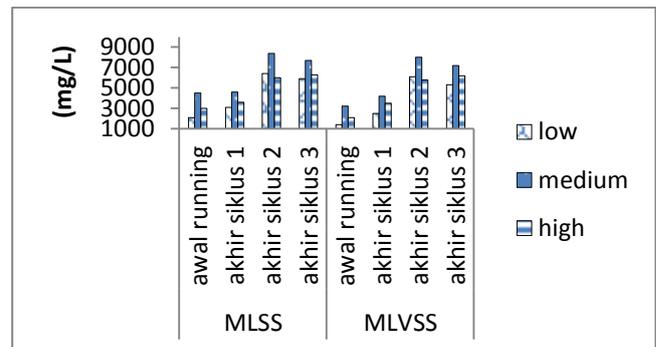


Gambar 8. Hasil Analisis Nitrat dengan durasi waktu aerobik 31,5 jam dan anoksik 13,5 jam.

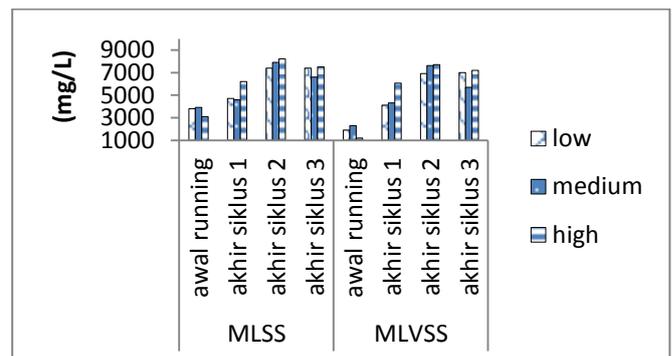
Berbanding terbalik dengan hasil analisis ammonium-nitrogen bahwa dengan semakin banyaknya jumlah ketersediaan oksigen maka semakin baik juga removal yang dicapai. Pada nitrat dapat dilihat bahwa pada proses pengolahan dengan waktu aerasi lebih sebentar akan menghasilkan efisiensi removal yang semakin baik. Penurunan nitrat-nitrogen terbaik terjadi pada

C. Analisis Biomassa sebagai MLSS

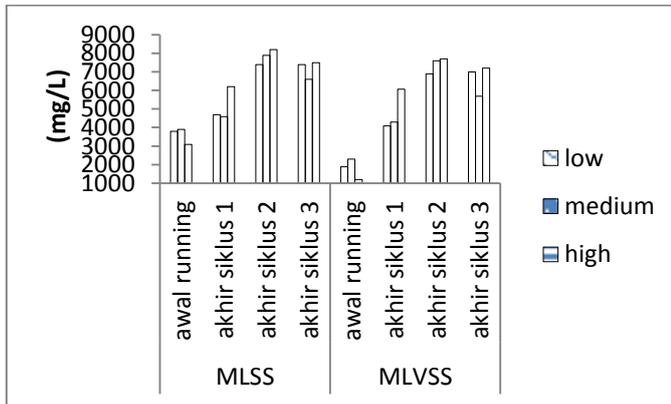
Mixed-Liquor Suspended Solid (MLSS) merupakan jumlah total dari padatan tersuspensi yang berupa material organik dan mineral termasuk di dalamnya mikroorganisme. Sedangkan *MLVSS* merupakan material organik mikroba, baim mikroba hidup maupun mikroba mati dan hancuran sel. Pengukuran MLSS ini dilakukan untuk memastikan bahwa reaktor telah berjalan sesuai dengan kriteria desain. Selain itu, pengukuran biomassa dengan jumlah *MLVSS* juga dilakukan untuk mengetahui besar perbandingan jumlah substrat dengan mikroorganisme yang tersedia (rasio F/M) di dalam reaktor. Selama berjalannya penelitian MLSS akan meningkat karena adanya pertumbuhan dan perkembangbiakan dari mikroorganisme di dalam reaktor. Semakin banyak MLSS yang digunakan dalam sistem pengolahan mengindikasikan bahwa terdapat lebih banyak mikroorganisme pengurai dalam sistem tersebut sehingga aktivitas penguraian bahan organik dan nitrogen yang terkandung dalam limbah lebih cepat [10]. Namun, selama berlangsungnya penelitian terlihat bahwa pada kondisi aerobik yang lebih lama akan menghasilkan jumlah biomassa yang lebih banyak. Hasil analisis MLSS dapat dilihat pada Gambar 9, Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 9. Hasil Analisis MLSS pada durasi waktu aerobik 13,5 jam dan anoksik 31,5 jam



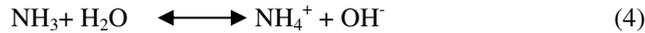
Gambar 10. Hasil Analisis MLSS pada durasi waktu aerobik 22,5 jam dan anoksik 22,5 jam.



Gambar 11. Hasil Analisis MLSS pada durasi waktu aerobik 31,5 jam dan anoksik 13,5 jam.

D. Analisis pH

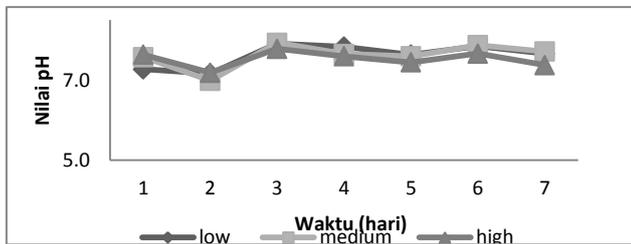
Selain jumlah biomassa dan *Dissolved Oxygen*, parameter lain yang berpengaruh terhadap proses nitrifikasi dan denitrifikasi yang terjadi adalah pH. Nilai pH di setiap reaktor selama kegiatan *running* berlangsung yaitu berkisar antara 6.76 – 8.25. Pada masing – masing reaktor uji terjadi fluktuasi nilai pH. Nilai Kenaikan nilai pH ini dapat diakibatkan dari perubahan bentuk ammonia-nitrogen menjadi bentuk ion yang berupa ammonium jika terlarut di dalam air. Sehingga ion OH⁻ di dalam limbah akan menjadi naik yang berdampak pada naiknya nilai pH sebagaimana reaksi berikut:



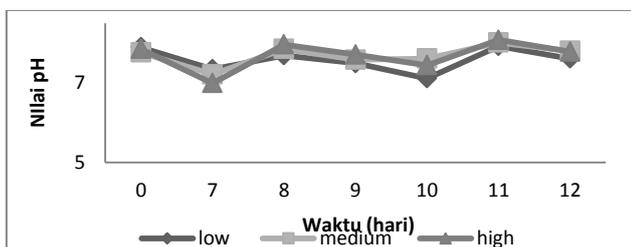
Selain itu, nilai pH di dalam reaktor juga dapat mengalami penurunan jika terjadi proses pembentukan nitrat (Sawyer *et al.*, 2003), dengan reaksi:



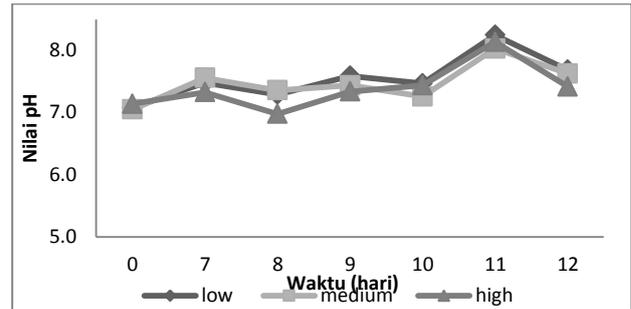
Reaksi di atas menunjukkan bahwa setiap mol ammonium yang dioksidasi akan memproduksi 2 mol ion hidrogen, yang hasilnya akan menurunkan nilai pH pada lingkungan yang nilai buffernya rendah [11]. Hal ini menunjukkan bahwa bakteri autotrofik yang ada pada proses nitrifikasi sangat sensitif terhadap nilai pH. Akan tetapi, kenaikan dan penurunan nilai pH pada semua variasi konsentrasi limbah tidak signifikan, nilainya relatif hampir sama dan masih berada pada kisaran nilai pH netral. Pengukuran nilai pH dari masing – masing reaktor dapat dilihat pada Gambar 12; Gambar 13 dan Gambar 14.



Gambar 12. Hasil Analisis pH pada durasi waktu aerobik 13,5 jam dan anoksik 31,5 jam.



Gambar 13. Hasil Analisis pH pada durasi waktu aerobik 22,5 jam dan anoksik 22,5 jam.



Gambar 14. Hasil Analisis pH pada durasi waktu aerobik 31,5 jam dan anoksik 13,5 jam.

Nilai pH di dalam setiap reaktor masih termasuk ke dalam rentang pH yang baik untuk pertumbuhan dan perkembangbiakan bakteri. Nilai pH tersebut yaitu 6,5-7,5 dan berada pada suhu 25°C-35°C. Nilai pH optimum untuk proses nitrifikasi berkisar antara pH 7-8, apabila pH berada kurang dari 6,5 maka tidak akan terjadi pertumbuhan bakteri autotrofik (bakteri nitrifikasi) [11]. Pada penelitian ini nilai pH yang ditunjukkan oleh reaktor MBBR outlet menunjukkan rentang pH optimum yaitu sebesar 7,5 – 8.25 yang termasuk pada rentang pH optimum proses nitrifikasi sehingga memiliki besar efisiensi removal ammonia-nitrogen yang baik. Hal ini menunjukkan mikroorganisme yang berkembang dengan baik adalah bakteri nitrifikasi (autotrofik) atau mikroorganisme aerobik obligat [4]. Pada penelitian ini nilai pH yang ditunjukkan pada reaktor dengan durasi pengolahan aerobik 31,5 jam- anoksik 13,5 jam menunjukkan pH optimum untuk proses nitrifikasi sehingga memiliki besar efisiensi removal ammonium-nitrogen paling baik. Hal ini menunjukkan mikroorganisme yang berkembang dengan baik adalah bakteri nitrifikasi (autotrofik) atau mikroorganisme aerobik obligat [4].

IV. KESIMPULAN

Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) dengan media kaldness (K1) mampu mengolah limbah domestik dengan menurunkan kandungan anomium-nitrogen adalah sebesar 92,8%, nitrat-nitrogen sebesar 66,4%, nitrit-nitrogen sebesar 99,7% dan total nitrogen sebesar 67,4%. Sedangkan waktu durasi pengolahan yang paling optimum adalah dengan lama durasi pengolahan aerobik selama 31,5 jam dan anoksik selama 13,5 jam. Pada waktu durasi pengolahan tersebut menghasilkan efisiensi penurunan nitrogen yang paling baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sastrawijaya, *Pencemaran Lingkungan*. Jakarta: PT. Rineka Cipta, 2009.
- [2] H. Effendi, *Telaah Kualitas Air bagi Pengolahan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*. Yogyakarta: Kanisius, 2003.
- [3] S. Luostarinen, S. Luste, L. Valentin, and J. Rintala, "Nitrogen Removal From On-site Anaerobic Effluents Using Intermittently Aerated Moving Bed Biofilm Reactors at Low Temperatures," *Water Res.*, pp. 1607 – 1615, 2006.
- [4] Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, 4th ed. New York: Mc Graw Hill Book Co., 2003.
- [5] M. Kemani, B. Bina, H. Moyalhedian, and M. Amin, "Biological phosphorus and nitrogen removal from wastewater using moving bed biofilm process," *Irian J. Biotechnol.*, vol. 7, no. 1, pp. 19–27, 2009.
- [6] F. Qaderi, B. Ayati, and H. Ganjidoos, "Role of Moving Bed Biofilm Reactor and Squencing Batch Reactor in Biological

- Degradation of Formaldehyde Wastewater,” *J. Environ. Heal. Sci.*, vol. 8, pp. 295–306, 2011.
- [7] M. Romli, Suprihatin, and D. Sulinda, “Penentuan Nilai Parameter Kinetika Lumpur Aktif untuk Pengolahan Air Lindi Sampah (LeacheteI),” *J. Tek. Ind. Pertan.*, vol. 14, pp. 56–66, 2004.
- [8] A. Herlambang and R. Marsidi, “Proses Denitrifikasi dengan sistem Biofilter untuk pengolahan air limbah yang mengandung nitrat,” *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 4, no. 1, p. 46, 2003.
- [9] C. N. Sawyer, P. L. McCarty, and G. F. Parkin, *Chemistry for Environmental Engineering and Science*, 5th ed. Singapore: Mc Graw Hill, 2003.
- [10] D. Agustiyani and H. Imamuddin, “Pertumbuhan Kultur Nitrifikasi Campuran Pada Senyawa Amonium,” in *Prosiding Seminar Nasional Biologi XVI dan Kongres Nasional Perhimpunan Biologi Indonesia (PBI) XII*, 2000.
- [11] S. Tarre and M. Green, “High-Rate Nitrification at Low pH in Suspenden and Attached-Biomass Reactors,” *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 70, pp. 6481–6487, 2004.