

Pengaruh Durasi Penggunaan Micro Bubble Terhadap Kualitas Air Limpasan Green Roof Ekstensif Berdasarkan Variasi Vegetasi

Idham Ilyas Budhi Mahendra¹, Abdillah Luthfi¹, Advent Cahyo Jati¹, Allen Kurniawan¹, dan Yudi Chadirin^{1*}

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia; e-mail: yudi@apps.ipb.ac.id

ABSTRAK

Green roof menjadi salah satu alternatif metode pemanenan air hujan seiring dengan berkurangnya daerah resapan air. Penambahan nutrisi penunjang pertumbuhan tanaman membuat air limpasan *green roof* menjadi turun kualitasnya. Beberapa parameter kualitas air seperti kekeruhan, total dissolved oxygen (TDS), daya hantar listrik, dan total suspended solid (TSS) masih belum memenuhi baku mutu air baku. *Micro bubble* (MB) menjadi salah satu metode alternatif pengolahan air limbah melalui proses aerasi untuk mempercepat waktu biodegradasi dua kali lipat lebih cepat. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh MB, menentukan status mutu, dan nilai efektivitas air limpasan *green roof*. Penelitian ini menggunakan variasi tanpa vegetasi dan vegetasi berupa lili paris, kacang hias, krokot mawar. Kinerja MB akan diuji melalui uji parameter temperatur, TDS, pH, dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (COD), amonia, dan nitrit berdasarkan waktu pengoperasian MB selama 30, 45, 60, dan 75 menit. Acuan baku mutu menggunakan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VI. Penentuan status mutu air menggunakan metode STORET. Penggunaan *micro bubble* dalam proses pengolahan air limpasan *green roof* mengurangi beberapa parameter pencemar air dan telah memenuhi standar mutu untuk temperatur, TDS, pH, DO, dan amoniak. Durasi pengoperasian MB selama 75 menit menghasilkan efektivitas penyisihan TDS, COD, amonia dan nitrit terbesar dengan nilai efisiensi mencapai 7,06%, 17,43%, 75,42% dan 41,84%. Nilai efisiensi penyisihan pada waktu pengoperasian MB selama 75 menit tersebut ditunjukkan dengan perubahan status mutu air limpasan *green roof* dengan kelas B (tercemar ringan) berdasarkan US-EPA. Status mutu ini lebih baik dibandingkan waktu pengoperasian 30, 45, dan 60 menit yang mencapai Kelas C (tercemar sedang). Strategi optimalisasi dan implementatif untuk pengolahan air limpasan sehingga kualitas air dapat memenuhi baku mutu.

Kata kunci: aerasi, air hujan, green roof ekstensif, kualitas air, micro bubble.

ABSTRACT

Green roofs have emerged as an alternative method for rainwater harvesting in response to the decreasing infiltration areas. However, adding nutrients to support plant growth can degrade the quality of green roof runoff. Water quality parameters, such as turbidity, total dissolved solids (TDS), electrical conductivity, and total suspended solids (TSS), still need to meet the standard water quality criteria. Microbubbles (MB) present a promising alternative wastewater treatment method through aeration, significantly accelerating biodegradation. This study aims to analyze the effect of MB, determine water quality status, and assess the effectiveness of green roof runoff. The research involved variations with and without vegetation, specifically using plants like spider lily (*Chlorophytum comosum*), ornamental beans (*Arachis pinto*), and purslane (*Portulaca grandiflora*). MB performance was evaluated through parameter tests for temperature, TDS, pH, dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (COD), ammonia, and nitrite over MB operation times of 30, 45, 60, and 75 minutes. The water quality standards referenced were based on Indonesian Government Regulation No. 22 of 2021, Appendix VI. Water quality status was determined using the STORET method. Using microbubbles to treat green roof runoff reduced several water pollutants and met quality standards for temperature, TDS, pH, DO, and ammonia. MB operation for 75 minutes yielded the highest removal efficiencies for TDS, COD, ammonia, and nitrite at 7.06%, 17.43%, 75.42%, and 41.84%, respectively. This operation duration improved the runoff water quality status to Class B (lightly polluted) based on US-EPA standards, compared to Class C (moderately polluted) for the 30, 45, and 60-minute operation times. Optimization and implementation strategies for wastewater treatment are essential to ensure water quality meets established standards.

Keywords: aeration, extensive green roof, water quality, micro bubble, rainwater harvesting

Citation: Mahendra, I. B. M., Luthfi, A., Jati, A. C., Kurniawan, A. dan Chadirin, Y. (2025). Pengaruh Durasi Penggunaan Micro Bubble Terhadap Kualitas Air Limpasan Green Roof Ekstensif Berdasarkan Variasi Vegetasi. Jurnal Ilmu Lingkungan, 23(x3), 830-844, doi:10.14710/jil.23.3.830-844

1. PENDAHULUAN

Atap hijau (*green roof*) menjadi salah satu alternatif metode pemanenan air hujan (*rainwater harvesting*) seiring dengan perubahan fungsi ruang terbuka hijau (RTH) di *urban area* (Mubarak, 2018). Perubahan fungsi ruang terbuka hijau (RTH) di *urban area* menyebabkan berkurangnya daerah resapan air. Di daerah perkotaan, seiring dengan perkembangan pembangunan, konversi lahan dari lahan terbuka menjadi daerah terbangun menyebabkan volume limpasan air hujan semakin besar. Luas permukaan atap menyumbang 40–50% dari total luas permukaan yang kedap air di daerah perkotaan (Stovin *et al.*, 2012). Konservasi sumber daya air menjadi fokus utama masa kini. Salah satunya adalah pemanfaatan air limpasan dari atap menjadi air baku sebagai upaya alternatif penyediaan air bersih dan sanitasi yang layak di *urban area*. Oleh karena itu, pengaplikasian atap hijau (*green roof*) dinilai lebih efektif untuk mengurangi volume limpasan air hujan yang tidak dapat meresap ke dalam tanah. Atap hijau (*green roof*) mampu menahan air hujan pada media tanam dalam jangka waktu yang lama dibandingkan dengan atap konvensional. Atap hijau (*green roof*) mampu menampung air limpasan hingga 60% dari total air limpasan dalam berbagai macam kondisi hujan (Shafique *et al.*, 2018). Pada atap bangunan gedung apartemen seluas 2.374 m² menghasilkan volume limpasan sebesar 63,94 m³ (Manik *et al.*, 2024). Dengan demikian, penggunaan atap hijau (*green roof*) dapat diaplikasikan sebagai metode alternatif pemanenan air hujan (*rainwater harvesting*) di area perkotaan sebagai wujud pembangunan kota dan permukiman yang berkelanjutan karena dapat menunda air limpasan dan dapat mengurangi risiko banjir.

Meskipun atap hijau (*green roof*) dinilai mampu menyimpan air lebih lama pada media tanam, tetapi proses ini dapat menimbulkan penurunan kualitas air limpasan. Substrat dari *green roof* dapat mengandung logam berat seperti Zn, Pb dan Fe. Selain itu bahan organik seperti C, N dan P dapat larut dalam air limpasan *green roof* (Dusza *et al.*, 2017). Pestisida yang terakumulasi dan menempel di permukaan tanaman dapat menjadi residu sehingga menyebabkan penurunan kualitas air limpasan *green roof* (Berndtsson, 2010). Demikian pula dengan parameter fisika, seperti kekeruhan, *total suspended solid* (TSS), daya hantar listrik (DHL), dan *total dissolved solid* (TDS), masih belum memenuhi baku mutu Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 tentang Air Untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi (Agustia *et al.*, 2017).

Dalam pengolahan air limbah, aerasi menjadi bagian utama dalam suplai oksigen sebagai pendegradasi polutan dalam air. Aerasi membantu proses biodegradasi secara aerobik dalam air limbah. Melalui pengurangan kandungan CO₂ dalam air, besi (Fe) dan mangan (Mn) akan teroksidasi dan mengendap sehingga dapat dihilangkan dengan sedimentasi (Yuniarti *et al.*, 2019). Salah satu

teknologi aerasi yang umum digunakan dalam pengolahan air limbah adalah dengan metode difusi (*diffused air system*) (Drewnowski *et al.*, 2019). Luas permukaan sangat berpengaruh terhadap efektivitas dari proses aerasi (Hartini, 2012). Teknologi aerasi menggunakan *micro bubble* (MB) dinilai lebih efektif karena memiliki luas permukaan gelembung yang lebih luas dengan volume udara yang kecil sehingga mampu bertahan dalam waktu yang lama di dalam air (Khan *et al.*, 2020). MB dapat digolongkan sebagai *fine bubble* (0,01–100 µm) yang memiliki ukuran diameter gelembung kisaran 1–100 µm (Azevedo *et al.*, 2019). Aerasi menggunakan MB dinilai mampu meningkatkan efisiensi detoksifikasi dan mengurangi kandungan organik, fisika dan kimia pada air limbah dengan biaya operasional yang lebih terjangkau dibandingkan aerasi konvensional (Agarwal *et al.*, 2011).

Pengaplikasian MB dalam proses aerasi pengolahan limbah cair mampu menurunkan konsentrasi TDS hingga rentang 15–19 ppm (Made Joni *et al.*, 2020). Selain itu, pH cenderung mencapai nilai konstan pada rentang nilai 7,50–8,25 (Made Joni *et al.*, 2020). MB juga dinilai mampu meningkatkan kadar efisiensi penyisihan dari *chemical oxygen demand* (COD), amonia, dan total fosfat pada pengolahan air limbah (Wang dan Zhang, 2017). Nilai efisiensi penyisihan COD meningkat sebesar 85–95% setelah waktu perlakuan selama empat jam (Ahmadi *et al.*, 2022). Demikian juga dengan nilai efisiensi penyisihan total nitrogen meningkat sebesar 84–96% setelah diaerasi menggunakan MB (Ahmadi *et al.*, 2022). Pada pengolahan limbah *grey water* nilai *dissolved oxygen* (DO) jenuh dapat mencapai nilai 9,5 mg/L setelah perlakuan selama 12 menit menggunakan MB (Mawarni dan Suryani, 2023).

Teknologi MB memiliki koefisien perpindahan gas (KLa) yang lebih baik dan lebih menguntungkan untuk proses biodegradasi (Fan *et al.*, 2023). Penggunaan MB menghasilkan tingkat pemanfaatan oksigen dan koefisien perpindahan massa volumetrik dua kali lipat dibandingkan dengan sistem aerasi konvensional dalam sistem pengolahan air limbah (Zhang *et al.*, 2018). Penggunaan MB dalam pengolahan air limbah memiliki pengaruh dalam mengurangi kandungan bahan organik seiring dengan lamanya durasi penggunaan MB. Oleh karena itu, penggunaan teknologi MB sebagai alternatif metode pengolahan air limbah memiliki potensi untuk diaplikasikan ke dalam pengolahan air limpasan *green roof*. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki tujuan untuk: (1) menganalisis pengaruh durasi penggunaan MB terhadap kualitas air limpasan *green roof* berdasarkan alternatif vegetasi ekstensif; (2) menentukan status mutu air limpasan *green roof* dengan metode STORET; dan (3) menentukan nilai efektivitas MB dalam pengolahan air limpasan *green roof* berdasarkan parameter TDS, COD, amonia, dan nitrit.

Vegetasi ekstensif pada penelitian ini disimulasikan untuk tiga jenis vegetasi, yaitu lili paris (*Chlorophytum comosum*), kacang hias (*Arachis*

pintoii), dan krokot mawar (*Portulaca grandiflora*). Dasar pemilihan tiga jenis vegetasi tersebut berdasarkan pada tipe *green roof*, lokasi geografis, intensitas hujan, kelembaban, angin, paparan sinar matahari, karakteristik dan ketebalan media tanam (Shafique *et al.*, 2018). Tanaman lili paris memiliki toleransi tinggi terhadap kekeringan dan cuaca ekstrem, perakaran yang dangkal, kebutuhan air rendah (L. Wang *et al.*, 2017), perawatan yang minimal dan mampu menyerap logam Hg dan Cd dari udara melalui daunnya (Wei *et al.*, 2017). Kacang hias dipilih karena mampu menjaga kadar air dalam tanah hingga 27,39%, memiliki perakaran yang dangkal (10 cm), memiliki toleransi tinggi terhadap kekeringan dan temperatur panas pada negara beriklim tropis (Chozin *et al.*, 2018). Krokot mawar mampu bertahan pada kondisi cuaca yang kering dan ekstrem, morfologi akar pendek, lunak dan berserabut halus sehingga tidak memerlukan banyak air serta biaya perawatan murah (Vijayaraghavan dan Raja, 2014). Sebagai kontrol, perlakuan lain disimulasikan tanpa vegetasi. *Extensive green roof* digunakan dalam penelitian ini dengan ketebalan media tanam maksimal 10 cm. *Green roof* tipe ini dipilih karena ringan, tidak memerlukan irigasi, lebih murah dan tidak memerlukan pemeliharaan secara rutin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *microbubble generator* terhadap kualitas air limpasan *green roof* dan menentukan nilai efektivitas *microbubble generator* dalam pengolahan air limpasan *green roof*.

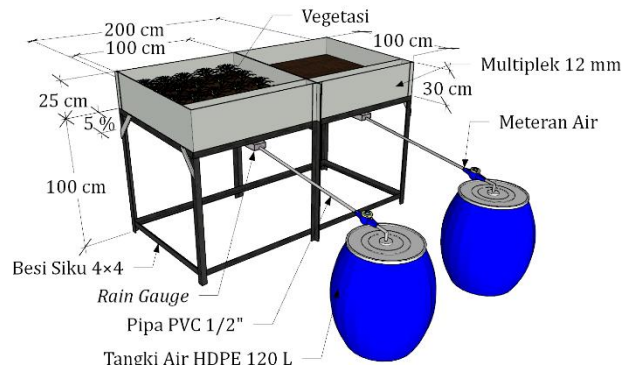
2. METODE PENELITIAN

2.1. Rancang Model Green Roof

Model *green roof* sejumlah empat box dengan variasi vegetasi berupa tanaman lili paris (*Chlorophytum comosum*/CC) pada box-1, kacang hias (*Arachis pintoii*/AP) pada box-2, krokot mawar (*Portulaca grandiflora*/PG) pada box-3, dan tanpa vegetasi (TN) sebagai kontrol pada box-4. Box *green roof* terbuat dari papan kayu multiplek dengan ketebalan 12 mm yang diletakkan di atas besi penyangga yang terbuat dari besi siku ukuran 4×4. Penyusunan model *green roof* dimulai lapisan paling bawah yaitu lapisan geomembran dengan ketebalan 0,6 mm, lapisan drainase dengan ketebalan 2 cm, lapisan zeolit dengan ketebalan 5 cm, lapisan media tanam berupa tanah yang dicampur dengan pupuk kompos dengan ketebalan 10 cm berdasarkan pemilihan ketebalan maksimal media tanam dan lapisan vegetasi untuk tipe *extensive green roof*.

Green roof tipe ekstensif ini dipilih karena ringan, tidak memerlukan irigasi, lebih murah dan tidak memerlukan pemeliharaan secara rutin. Kemiringan box *green roof* sebesar 5%. Penentuan besar kemiringan box *green roof* ini agar air hujan yang melalui media tanam melimpas dengan sempurna dan masuk ke tangki penampungan air. Kemiringan sebesar 5% merupakan besar persentase kemiringan yang terjadi akibat perubahan ketinggian sebesar 5 cm untuk setiap 100 cm penambahan panjang box

green roof. Air limpasan *green roof* yang melimpas ditampung pada tangki air berukuran 120 L untuk masing-masing box model *green roof*.



Gambar 1. Rancang Model Green Roof

2.2. Prosedur Pengumpulan Data

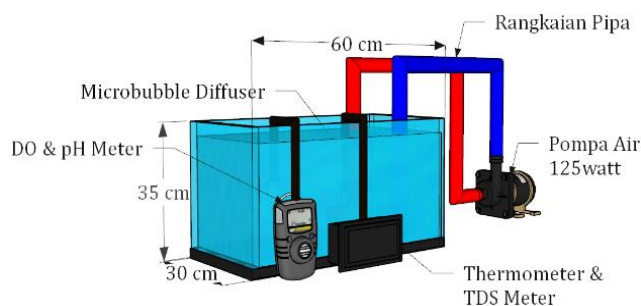
Pengumpulan data dilakukan pada saat terjadinya hujan pada rentang bulan April hingga Juni 2024. Sampel air limpasan diperoleh melalui tangki air ukuran 120 L yang diletakkan di depan model *green roof*. Air limpasan yang melalui *green roof* mengalir melalui *rain gauge* kemudian dilewatkan pada meteran air untuk mengetahui volume limpasan dan kemudian masuk ke tangki penampungan. Air di dalam tangki penampungan itulah yang digunakan sebagai sampel air limpasan *green roof* dan dilakukan pengujian kualitas air di laboratorium. Pengambilan sampel uji dilakukan saat hujan turun dari awal penanaman hingga 30 hari. Sampel yang digunakan untuk pengujian kualitas air adalah air limpasan *green roof* dari keempat box model *green roof* tersebut.

Jenis parameter kualitas air terukur berupa parameter fisika dan kimia. Parameter fisika berupa temperatur diukur berdasarkan SNI 06-6989.23-2005 tentang Cara Uji Suhu dengan Termometer dan TDS berdasarkan SNI 06-6989.27:2019 tentang Cara Uji Padatan Tersuspensi Total (TDS) Secara Gravimetri. Parameter kimia berupa pH diukur berdasarkan SNI 06-6989.11-2019 Cara Uji Derajat Keasaman (pH) dengan Menggunakan pH Meter, nitrit mengacu pada SNI 06-6989.9-2004 tentang Cara Uji Nitrit (NO₂-N) Secara Spektrofotometri, COD berdasarkan SNI 6989.2:2019 Cara Uji Kebutuhan Oksigen Kimiawi (*Chemical Oxygen Demand*/COD) dengan Refluks Tertutup Secara Spektrofotometri, DO berdasarkan SNI 06-6989.14-2004 Cara Uji Oksigen Terlarut Secara Iodometri (Modifikasi Azida) dan amonia berdasarkan SNI 06-6989.30-2005 Cara Uji Kadar Amonia Dengan Spektrofotometer Secara Fenat.. Pengambilan sampel untuk parameter temperatur, TDS, pH dan DO dilakukan secara *in-situ*, sedangkan sampel nitrit, amonia dan COD dilakukan secara *ex-situ*.

2.3. Pengujian dan Analisis Data

MB *diffuser* dioperasikan selama 30, 45, 60 dan 75 menit untuk pengolahan air limpasan *green roof* pada tiap tangki air. Sampel air limpasan pada tiap

perlakuan waktu menggunakan volume sebanyak 60 L untuk setiap tangki air. Setelah dilakukan perlakuan menggunakan MB, sampel untuk setiap perlakuan waktu aerasi diambil masing-masing sebanyak 330 mL. Hasil analisis kualitas air limpasan *green roof* melalui MB kemudian dibandingkan dengan Peraturan Menteri Kesehatan RI Nomor 2 Tahun 2023 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan Air untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi serta Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VI tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Baku Mutu Air Kelas II. Baku mutu pada masing-masing parameter dipilih berdasarkan standar nilai batas yang paling ketat. Status mutu air ditentukan menggunakan metode *Storage and Retrieval* (STORET) berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003 tentang Pedoman Penentuan Status Mutu Air.



Gambar 2. Konfigurasi Unit Pengujian Aerasi

Penelitian ini memiliki batasan pada 3 jenis tanaman yang digunakan, yang hasilnya mungkin tidak bisa digeneralisasi untuk tanaman lain dengan karakteristik berbeda. Air limpasan yang digunakan merupakan limpasan yang dihasilkan dari model *green roof* berukuran 1 x 1 m yang berasal dari curah hujan pada rentang bulan April hingga Juni sehingga belum mencerminkan variasi musim hujan tahunan. Namun demikian hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran fungsi *green roof* dalam pengelolaan air limpasan di wilayah urban.

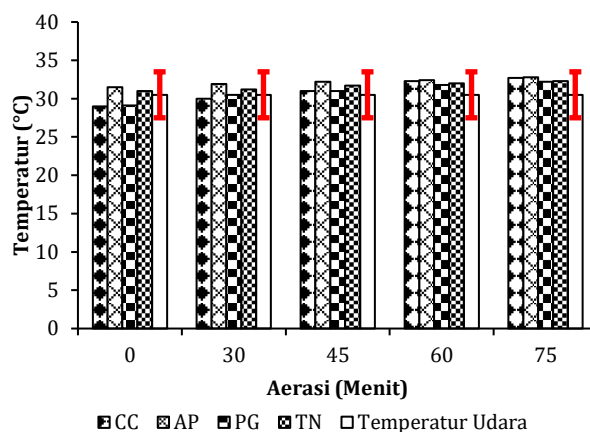
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Waktu Aerasi Terhadap Temperatur

Pada saat sebelum dilakukan aerasi menggunakan MB, temperatur awal pada sampel CC, AP, PG dan TN berturut-turut mencapai 29 °C; 31,5 °C; 29,1 °C; dan 31 °C (Gambar 3). Kenaikan temperatur pada keempat sampel setelah dilakukan aerasi selama 75 menit berturut-turut mencapai 32,7 °C; 32,8 °C; 32,2 °C; dan 32,3 °C (Gambar 3). Temperatur awal dan akhir pada masing-masing sampel menunjukkan nilai yang memenuhi rentang baku mutu $\pm 3^{\circ}\text{C}$ dari temperatur udara sekitar pada saat pengujian yaitu sebesar 30,5 °C. Baku mutu pengujian temperatur ini berdasarkan pada Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Standar Baku

Mutu Kesehatan Lingkungan Air untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi.

Seiring dengan lamanya waktu aerasi, temperatur dari keempat sampel air limpasan *green roof* pun semakin meningkat. Peningkatan temperatur pada keempat sampel ini terjadi karena penggunaan mesin pompa saat air disirkulasi secara kontinu. Kenaikan temperatur memiliki nilai yang cenderung tinggi dari nilai 29 °C menjadi 32,7 °C untuk sampel CC dan dari nilai 29,1 °C menjadi 32,2 °C untuk sampel PG (Gambar 3). Hal ini terjadi karena temperatur awal dari kedua sampel cenderung lebih rendah dibandingkan dengan temperatur dari pompa sehingga temperatur akan naik seiring dengan lamanya waktu perlakuan. Kenaikan temperatur yang semakin tinggi akan berpengaruh terhadap penurunan nilai DO di dalam air (Lusiana *et al.*, 2020). Proses biodegradasi kandungan organik pada air limpasan *green roof* pun akan meningkat karena mikroorganisme biodegradasi akan lebih cepat melakukan metabolisme pada rentang temperatur yang cenderung lebih hangat (Indrayani dan Rahmah, 2018).



Gambar 3. Temperatur Air Limpasan *Green Roof*

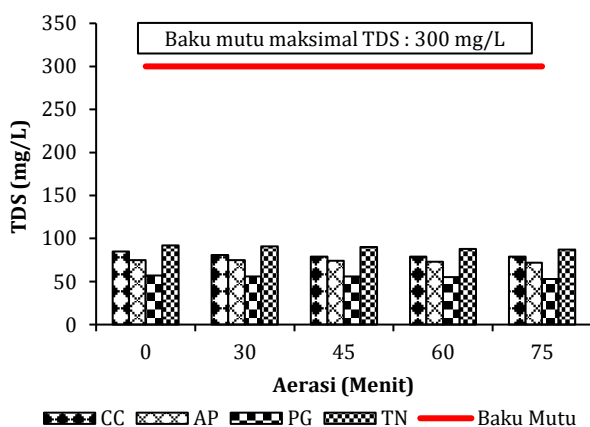
3.2. Pengaruh Waktu Aerasi Terhadap TDS

Nilai TDS pada masing-masing sampel air limpasan *green roof* menunjukkan penurunan konsentrasi seiring dengan lamanya waktu aerasi. Konsentrasi awal TDS teridentifikasi sebesar 85 mg/L pada sampel CC, 75 mg/L pada sampel AP, 57 mg/L pada sampel PG, dan 92 mg/L pada sampel TN (Gambar 4). Setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 75 menit, konsentrasi TDS pada sampel CC, AP, PG, dan TN menurun berturut-turut sebesar 79 mg/L, 72 mg/L, 53 mg/L dan 87 mg/L (Gambar 4). Nilai TDS setelah perlakuan aerasi pada keempat sampel air limpasan *green roof* menunjukkan nilai yang jauh lebih rendah dari baku mutu yang disyaratkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan RI Nomor 2 Tahun 2023 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan Air untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi maksimum sebesar 300 mg/L. Penurunan nilai TDS terbesar adalah pada sampel CC dengan nilai TDS awal sebesar 85 mg/L menjadi 79

mg/L. Pengurangan nilai TDS mencapai 6 mg/L dengan nilai efektivitas penyisihan setelah dilakukan aerasi selama 75 menit sebesar 7,06%. Adapun penurunan nilai TDS terendah adalah pada sampel AP dengan nilai TDS awal sebesar 75 mg/L menjadi 72 mg/L (Gambar 4). Pengurangan nilai TDS mencapai 3 mg/L dengan nilai efektivitas penyisihan setelah dilakukan aerasi selama 75 menit sebesar 4%.

Pemberian aerasi dapat membantu menurunkan nilai TDS karena pemberian oksigen ke dalam air limbah mampu memecah garam anorganik dan bahan organik yang terkandung dalam air limbah seperti natrium, kation kalium, hidrogen karbonat, klorida, sulfat, dan anion nitrat (Royani, 2020). Suplai oksigen yang banyak membuat proses oksidasi berjalan lebih cepat, sehingga beberapa ion logam terlarut (Fe^{2+} dan Mn^{2+}) dapat diubah menjadi bentuk yang tidak terlarut (Fe^{3+} dan MnO_2) yang akan mengendap dan dapat dihilangkan dengan metode filtrasi (Furia *et al.*, 2021). Pada sampel TN, konsentrasi awal TDS sebesar 92 mg/L merupakan nilai tertinggi dibandingkan sampel lainnya. Kondisi ini dapat terjadi karena tidak adanya vegetasi pada media tanam. Tidak adanya vegetasi membuat nutrisi yang ada pada media tanam terikat dengan partikel media tanam dan akan larut bersama dengan air hujan yang melimpas. Dengan adanya vegetasi pada media tanam, intersepsi dan dispersi air hujan akan berdampak pada batang, daun, tangkai dan akar pada tanaman (Han *et al.*, 2018).

Akar tumbuhan memiliki peran yang sangat penting dalam menyerap TDS dalam proses fitoremediasi (Kustiyaningsih dan Irawanto, 2020). Pada sampel PG diperoleh nilai awal TDS yang paling rendah yaitu sebesar 57 mg/L dibandingkan dengan sampel lainnya (Gambar 4). Berdasarkan hasil pengamatan, tanaman krokot mawar yang memiliki struktur morfologi akar yang halus dan bercabang sehingga memiliki luas permukaan yang lebih besar untuk menyerap nutrisi dari media tanam (Virha *et al.*, 2020). Luas permukaan akar yang luas membuat nutrisi yang ada pada media tanam terserap secara maksimal sehingga nutrisi yang terlarut pada limpasan air hujan lebih sedikit dan menyebabkan konsentrasi TDS lebih rendah.

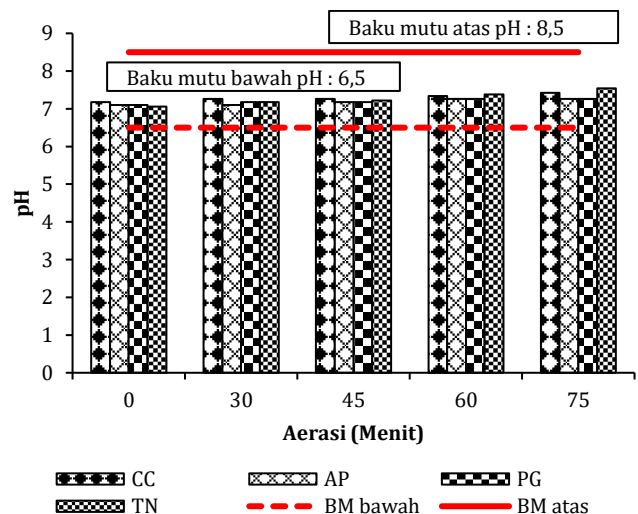
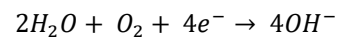


Gambar 4. Konsentrasi TDS Air Limpasan *Green Roof*

Kondisi serupa untuk konsentrasi awal TDS pada sampel AP sebesar 75 mg/L menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi awal TDS pada sampel CC sebesar 85 mg/L (Gambar 4). Berdasarkan hasil pengamatan, tanaman lili paris pada sampel CC memiliki struktur morfologi akar serabut dan dangkal sehingga penyerapan nutrisi pada media tanam cenderung lebih kecil karena memiliki luas bidang penyerapan akar yang lebih kecil. Luas permukaan akar yang kecil membuat nutrisi yang ada pada media tanam tidak terserap secara maksimal sehingga nutrisi yang terlarut pada air hujan yang melimpas lebih banyak dan menyebabkan nilai TDS nya lebih tinggi. Struktur morfologi akar yang berbeda-beda pada vegetasi menyebabkan perbedaan dalam penyerapan nutrisi dan polutan yang ada pada media tanam (Lv dan Wu, 2021).

3.3. Pengaruh Waktu Aerasi Terhadap Nilai pH

Nilai pH pada masing-masing sampel air limpasan *green roof* menunjukkan peningkatan seiring dengan lamanya waktu aerasi. Nilai pH pada sampel CC, AP, PG dan TN setelah perlakuan aerasi menggunakan MB berturut-turut sebesar 7,42; 7,26; 7,26 dan 7,54 (Gambar 5). Nilai pH pada keempat sampel air limpasan *green roof* setelah perlakuan aerasi selama 75 menit menggunakan *micro bubble* menunjukkan nilai yang tidak melebihi dari baku mutu yang disyaratkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan RI Nomor 2 Tahun 2023 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan Air untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi yaitu sebesar 6,5 – 8,5. Pemberian aerasi dapat meningkatkan nilai pH pada keempat sampel. Kadar oksigen terlarut yang berlebih dalam air dapat memengaruhi reaksi redoks sehingga meningkatkan konsentrasi ion OH^- dan menaikkan nilai pH (Pramleonita *et al.*, 2018). Reaksi redoks pembentukan ion OH^- dijelaskan melalui persamaan reaksi kimia berikut:



Gambar 5. pH Air Limpasan *Green Roof*

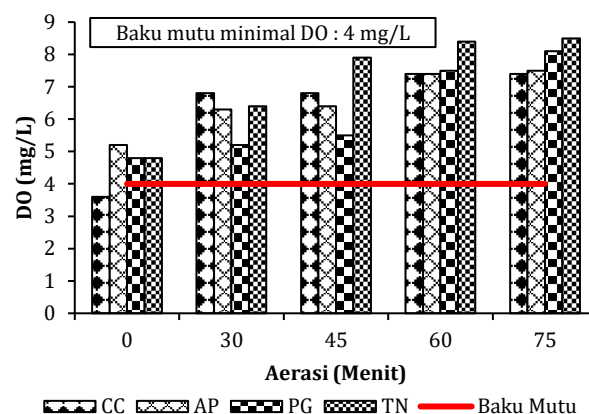
Besar atau kecilnya nilai pH pada sampel air limpasan *green roof* memiliki peranan penting dalam kelangsungan hidup mikroorganisme dalam air. Kenaikan pH ini cenderung akan mempercepat laju biodegradasi oleh mikroorganisme aerobik. Sementara itu, penurunan pH akan mengganggu perkembangan dan kemampuan mikroorganisme aerobik pada proses biodegradasi maupun proses biokimia di dalam sel mikroorganisme (Irfan *et al.*, 2022). Mikroorganisme aerobik lebih efektif dan optimal dalam melakukan biodegradasi pada rentang nilai pH 6,5 – 7,5 atau dalam kondisi pH netral cenderung basa (Hermanus *et al.*, 2015). Proses aerasi akan membuat kadar oksigen di dalam air limpasan *green roof* menjadi naik. Kenaikan nilai oksigen ini akan meningkatkan kinerja mikroorganisme aerobik dalam mengoksidasi bahan organik. Penyisihan ion hidrogen (H^+) sebagai reaksi biokimia saat proses oksidasi melibatkan oksigen dan bahan organik sehingga menaikkan nilai pH (del Álamo *et al.*, 2022). Nilai awal pH paling netral sebesar 7,06 terjadi pada sampel TN (Gambar 5). Nilai pH tersebut disebabkan tidak adanya vegetasi yang tumbuh pada media tanam. Tumbuhnya vegetasi pada suatu media tanam akan memengaruhi sifat fisika dan kimia tanah, salah satunya nilai pH (Rosalina dan Maipauw, 2019). Tanah pada hutan hujan tropis Taman Nasional Gunung Leuser dengan kerapatan vegetasi dan produktivitas serasah yang rendah memiliki nilai pH sebesar 5,3. Nilai ini lebih rendah dibandingkan tanah dengan kerapatan vegetasi yang tinggi sebesar 5,6 (Jayanthi dan Arico, 2017). Selain itu, tidak adanya vegetasi membuat air hujan yang meresap ke dalam tanah tidak termamfaatkan dan dapat melarutkan ion-ion hidrogen (H^+) sehingga air limpasan *green roof* pada sampel TN bersifat lebih asam (Kusuma dan Yanti, 2021).

3.4. Pengaruh Waktu Aerasi Terhadap DO

DO pada masing-masing sampel air limpasan *green roof* menunjukkan peningkatan konsentrasi seiring dengan lamanya waktu aerasi. Nilai DO pada sampel CC, AP, PG dan TN setelah perlakuan aerasi selama 75 menit menggunakan MB berturut-turut sebesar 7,4 mg/L; 7,5 mg/L; 8,1 mg/L; dan 8,5 mg/L (Gambar 6). Selain itu, DO pada keempat sampel air limpasan *green roof* setelah perlakuan aerasi menggunakan *micro bubble* menunjukkan nilai yang jauh melebihi dari nilai baku mutu minimum DO berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VI tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Baku Mutu Air Kelas II sebesar 4,0 mg/L. Kadar DO dalam air merupakan salah satu parameter kunci dalam penentuan kualitas air dan kesehatan ekosistem (Terry *et al.*, 2017).

Nilai konsentrasi DO yang tinggi pada air dapat menjadi indikator tingginya proses biodegradasi dan oksidasi oleh mikroorganisme maupun bakteri aerobik. Pemberian aerasi dapat menaikkan nilai DO pada air limpasan *green roof* karena aerasi dapat

memberikan suplai oksigen terlarut pada air. MB memiliki ukuran diameter gelembung berkisar 1–100 μm . Gelembung yang berukuran kecil ini membuat proses difusi ke dalam air menjadi lebih merata dan memiliki luas permukaan yang lebih luas dibandingkan dengan aerator konvensional (Deendarlianto *et al.*, 2015). Gelembung oksigen dari MB lebih stabil dan memiliki waktu tinggal lebih lama di dalam air sehingga tidak mudah berdifusi ke udara (Heriyati *et al.*, 2020).



Gambar 6. DO Air Limpasan *Green Roof*

Pemberian aerasi memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap kenaikan nilai DO pada keempat sampel air limpasan *green roof*. Pada menit-menit awal konsentrasi DO cenderung mengalami kenaikan yang drastis. Konsentrasi DO awal pada sampel CC, AP, PG dan TN secara berturut-turut sebesar 3,6 mg/L; 5,2 mg/L; 4,8 mg/L; dan 4,8 mg/L (Gambar 6). Setelah perlakuan aerasi selama 30 menit, konsentrasi DO sampel CC, AP, PG dan TN berturut-turut sebesar 6,8 mg/L; 6,3 mg/L; 5,2 mg/L; dan 6,4 mg/L. Kondisi ini dapat terjadi karena air limpasan *green roof* masih memiliki DO yang rendah pada tahap awal sebelum MB diinjeksikan sehingga menyerap oksigen lebih banyak dan cepat. Ketika udara diinjeksikan ke dalam air, kadar DO cenderung akan meningkat drastis karena perbedaan yang besar antara kadar DO awal dan DO setelah aerasi. Mekanisme transfer gas ini terjadi secara difusi. Difusi oksigen dari gelembung udara yang dihasilkan dari MB ke dalam air terjadi secara cepat pada awal aerasi karena belum terjadi kesetimbangan oksigen terlarut dalam air. Oleh karena itu, kontak antar gelembung udara yang diinjeksikan dengan air akan terjadi segera dan membuat nilai DO naik (Harfadli, 2019). Pada menit-menit akhir aerasi terlihat nilai DO pada keempat sampel mengalami kenaikan yang cenderung konstan pada kisaran 7,5–8,4 mg/L dan makin mencapai kondisi stabil pada konsentrasi 8,5 mg/L (Gambar 6). Kondisi ini terjadi karena air limpasan *green roof* telah mencapai titik jenuhnya atau mencapai kesetimbangan antara oksigen terlarut dalam air dan oksigen terlarut yang berdifusi ke udara ambien sehingga nilai kenaikan DO cenderung mulai konstan (Febiyanto, 2020).

Nilai konsentrasi oksigen jenuh (C_s) pada air dipengaruhi oleh temperatur dan tekanan parsial oksigen pada air. Nilai konsentrasi oksigen jenuh pada air dengan rentang temperature sebesar 32–33°C pada tekanan normal 1 atm atau 760 mmHg berkisar pada rentang nilai 7,30–7,18 mg/L (Zilmy *et al.*, 2022). Semakin tinggi temperatur pada air, maka kelarutan oksigen di dalam air akan semakin kecil (Heriyati *et al.*, 2020). Selain itu, kelimpahan oksigen di dalam air pun akan berdampak pada proses biodegradasi dan nitrifikasi. Semakin banyaknya suplai oksigen akan mempercepat mikroorganisme aerobik dalam proses biodegradasi bahan organik dan bakteri yang berperan dalam proses nitrifikasi (Liu *et al.*, 2016).

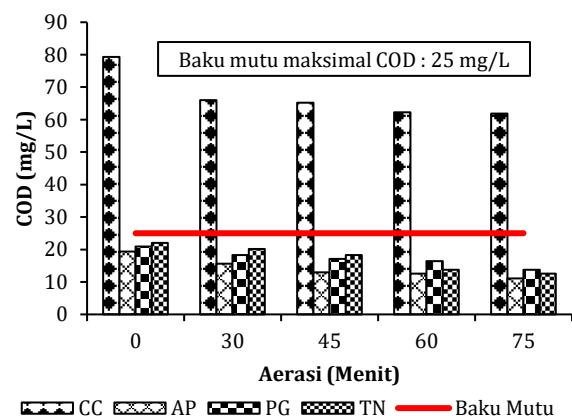
3.5. Pengaruh Waktu Aerasi Terhadap COD

Berbeda dengan pH dan DO, nilai COD pada masing-masing sampel air limpasan *green roof* menunjukkan penurunan konsentrasi sejalan dengan pertambahan waktu aerasi. Konsentrasi COD awal sebesar 79,27 mg/L pada sampel CC; 19,40 mg/L pada sampel AP; 20,92 mg/L pada sampel PG; dan 22,05 mg/L pada sampel TN (Gambar 7). Setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 75 menit, konsentrasi COD mengalami penurunan berturut-turut sebesar 61,84 mg/L, 11,06 mg/L, 13,72 mg/L dan 12,58 mg/L. Nilai COD pada sampel AP, PG dan TN air limpasan *green roof* setelah perlakuan aerasi menggunakan MB menunjukkan nilai di bawah baku mutu nilai maksimum sebesar 25 mg/L berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VI tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Baku Mutu Air Kelas II, sedangkan sampel CC masih belum memenuhi baku mutu yang disyaratkan. Hasil pengujian aerasi melalui MB selama 75 menit menghasilkan nilai penyisihan COD tertinggi terjadi pada sampel AP sebesar 42,97%, sedangkan penyisihan COD terendah terjadi pada sampel CC sebesar 21,99%.

Penyisihan COD tertinggi pada sampel AP diakibatkan ketersediaan bahan organik, seperti amonia sebagai senyawa turunan nitrogen, cukup melimpah pada air limpasan AP. Senyawa organik merupakan sumber nutrisi bagi mikroorganisme aerobik yang akan diolah menjadi senyawa yang lebih sederhana melalui proses oksidasi (Yuniarti *et al.*, 2019). Pemberian aerasi dapat menurunkan konsentrasi COD pada air limpasan karena mikroorganisme aerobik mulai bekerja mendegradasi bahan organik pada air limpasan. Penambahan kadar oksigen dalam air limbah membuat perkembangan mikroorganisme aerobik menjadi lebih cepat. Pertumbuhan dan jumlah mikroorganisme berbanding lurus dengan proses biodegradasi (Rahmawan *et al.*, 2023). Nilai konsentrasi DO yang tinggi pada air limpasan akan mempercepat proses biodegradasi. Kondisi ini dapat terjadi akibat mikroorganisme aerobik memerlukan suplai oksigen yang banyak sebagai bahan bakar dalam proses biodegradasi.

Aerasi berperan penting dalam proses respirasi aerobik yang mengoksidasi bahan organik dan biodegradasi bahan organik (Hidayah *et al.*, 2018). Semakin lama waktu perlakuan aerasi, penyisihan kadar COD pada air limpasan *green roof* akan semakin besar. Perlakuan aerasi selama 30 menit memiliki rentang nilai penyisihan COD lebih rendah daripada aerasi selama 75 menit. Rentang nilai pengurangan COD keempat sampel pada perlakuan aerasi 30 menit sebesar 1,89–13,26 mg/L dan sebesar 7,20–17,43 mg/L pada perlakuan aerasi 75 menit (Gambar 7).

Mikroorganisme aerobik akan memiliki waktu yang lebih banyak untuk melakukan biodegradasi seiring dengan durasi perlakuan aerasi. Pada proses aerobik, 50% bahan organik akan dioksidasi menjadi CO_2 dan H_2O dan 50% sisanya menjadi sel baru mikroorganisme. Semakin lama waktu aerasi membuat suplai oksigen dalam air limbah semakin meningkat sehingga penurunan COD akan semakin besar (Rivai *et al.*, 2022). Nilai awal COD pada sampel CC cenderung memiliki nilai yang tinggi sebesar 79,27 mg/L bila dibandingkan dengan sampel AP sebesar 19,40 mg/L, sampel PG sebesar 20,92 mg/L dan sampel TN sebesar 22,05 mg/L. Berdasarkan pengamatan, tanaman lili paris memiliki akar padat dan bersekat yang menjadi media pertumbuhan mikroorganisme. Tanaman ini mengeluarkan senyawa organik yang dikenal sebagai eksudat akar ke rizosfer sebagai pasokan nutrisi bagi mikroorganisme. Banyaknya nutrisi yang tidak diimbangi dengan ketersediaan suplai oksigen yang cukup pada media tanam membuat mikroorganisme mati. Proses degradasi mikroorganisme ini melepaskan bahan organik yang dapat meningkatkan nilai COD ketika terurai (Enagbonma *et al.*, 2023).



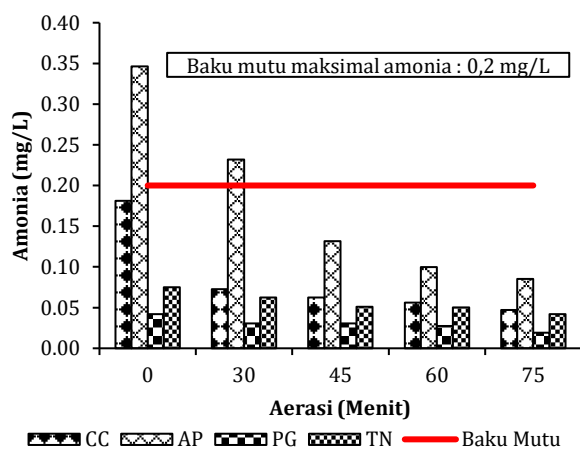
Gambar 7. COD Air Limpasan *Green Roof*

3.6. Pengaruh Waktu Aerasi Terhadap Amonia

Amonia pada masing-masing sampel air limpasan *green roof* menunjukkan penurunan konsentrasi seiring dengan penambahan waktu aerasi. Nilai konsentrasi awal amonia pada sampel CC, AP, PG, dan TN berturut-turut sebesar 0,181 mg/L; 0,346 mg/L; 0,042 mg/L; dan 0,075 mg/L (Gambar 8). Setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 75 menit, nilai konsentrasi akhir amonia mencapai berturut-

turut sebesar 0,047 mg/L untuk CC; 0,085 mg/L untuk AP; 0,019 mg/L untuk PG; dan 0,042 mg/L untuk TN (Gambar 8). Amonia pada keempat sampel air limpasan *green roof* setelah perlakuan aerasi menggunakan MB menunjukkan konsentrasi telah memenuhi baku mutu sebesar nilai maksimum mencapai 0,2 mg/L berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VI tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Baku Mutu Air Kelas II. Penyisihan konsentrasi amonia terbesar terjadi pada sampel AP dengan efisiensi mencapai 75,42% selama aerasi dijalankan 75 menit (Gambar 8). Adapun penurunan nilai amonia terjadi pada sampel PG dengan efisiensi mencapai 54,46% untuk periode aerasi 75 menit (Gambar 8).

Konsentrasi amonia cenderung meningkat disebabkan adanya bintil akar pada tanaman kacang hias. Tanaman ini mengikat nitrogen dari atmosfer dan mengubahnya menjadi amonia. Bakteri *Bradyrhizobium sp.* yang umumnya hidup pada bintil akar *Arachis pintoi* bersimbiosis dengan akar tanaman melalui proses fiksasi nitrogen (El-sherbeny *et al.*, 2023). Simbiosis mutualisme ini menyebabkan media tanam banyak mengandung amonia untuk terlarut di dalam air hujan saat melalui media tanam sehingga konsentrasi awal amonia pada sampel AP lebih tinggi dibandingkan sampel yang lain.



Gambar 8. Amonia Air Limpasan *Green Roof*

Konsentrasi awal amonia pada sampel PG menghasilkan nilai terendah sebesar 0,042 mg/L dibandingkan dengan sampel lainnya (Gambar 8). Konsentrasi amonia cenderung rendah disebabkan oleh tanaman krokot mawar yang memiliki struktur morfologi akar halus dan bercabang sehingga memiliki luas permukaan yang lebih besar untuk menyerap nutrisi dari media tanam (Virha *et al.*, 2020). Salah satu nutrisi penunjang pertumbuhan tanaman pada media tanam adalah amonia. Dengan morfologi akar yang halus dan bercabang, penyerapan amonia akan lebih mudah pada media tanam sebagai sumber nitrogen esensial penunjang pertumbuhan tanaman. Dengan demikian, nilai amonia rendah telah

terserap maksimal oleh akar tanaman krokot mawar ketika air hujan jatuh dan melimpas melalui media tanam.

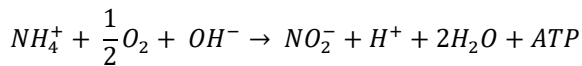
Selain itu, pemberian aerasi membuat suplai oksigen di dalam air limpasan *green roof* menjadi melimpah. Banyaknya oksigen ini dimanfaatkan oleh mikroorganisme aerobik untuk mengurai amonia menjadi unsur yang lebih sederhana seperti nitrit melalui proses nitrifikasi (Hidayah *et al.*, 2018). Setelah perlakuan aerasi selama 75 menit terbukti konsentrasi amonia pada keempat sampel menurun dan telah memenuhi persyaratan baku mutu. Semakin lama waktu aerasi, suplai oksigen dalam air semakin meningkat sehingga penurunan kadar amonia akan semakin besar (Rivai *et al.*, 2022). Kondisi temperatur dan pH yang optimal pun memengaruhi kinerja mikroorganisme aerobik. Mikroorganisme aerobik lebih efektif dan optimal dalam melakukan biodegradasi pada rentang nilai pH 6,5 – 7,5 atau dalam kondisi pH netral cenderung basa (Hermanus *et al.*, 2015). Demikian pula dengan proses biodegradasi, mikroorganisme akan lebih cepat melakukan proses metabolisme pada rentang temperatur 25–35°C atau cenderung pada lingkungan mesofilik (Indrayani dan Rahmah, 2018).

3.7. Pengaruh Waktu Aerasi Terhadap Nitrit

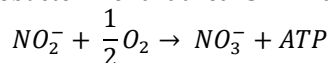
Nitrit pada masing-masing sampel air limpasan *green roof* menunjukkan penurunan konsentrasi seiring waktu pengoperasian MB. Nilai konsentrasi awal nitrit sebesar 0,122 mg/L pada sampel CC; 0,191 mg/L pada sampel AP; 0,038 mg/L pada sampel PG; dan 0,088 mg/L pada sampel TN (Gambar 9). Konsentrasi awal nitrit pada sampel AP sebesar 0,191 mg/L memiliki nilai tertinggi dibandingkan dengan sampel lainnya. Setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 75 menit, penurunan konsentrasi nitrit pada sampel CC, AP, PG, dan TN berturut-turut sebesar 0,093 mg/L; 0,113 mg/L; 0,022 mg/L; dan 0,080 mg/L (Gambar 9). Hanya konsentrasi nitrit akhir (0,022 mg/L) pada sampel PG menunjukkan nilai di bawah baku mutu sebesar nilai maksimum 0,06 mg/L berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VI tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Baku Mutu Air Kelas II. Nilai nitrit pada sampel CC, AP dan TN masih melebihi batas maksimal baku mutu yang disyaratkan oleh PP Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VI Baku Mutu Air Kelas II.

Tingkat penyisihan nitrit tertinggi sebesar 40,6% dihasilkan dari sampel AP, sedangkan penyisihan nitrit terendah sebesar 9% dihasilkan dari sampel TN setelah pengoperasian MB selama 75 menit. Nilai konsentrasi nitrit yang cenderung tinggi sebesar 0,191 mg/L pada sampel AP disebabkan tingginya konsentrasi amonia sebesar 0,364 mg/L. Semakin besar laju beban amonia pada limpasan air hujan, maka laju nitrifikasi akan semakin bertambah (Munfaridah *et al.*, 2022). Tingginya laju nitrifikasi ini dapat menghambat proses transformasi amonia

menjadi nitrit. Dengan demikian, peningkatan konsentrasi amonia berbanding lurus dengan tingginya konsentrasi nitrit (Munfaridah *et al.*, 2022). Kondisi substrat yang berlebih juga berpengaruh terhadap proses nitrifikasi. Suplai oksigen dan substrat yang berlebih dari aerasi menggunakan MB dimanfaatkan oleh mikroorganisme aerobik untuk mengurai nitrit menjadi unsur yang lebih sederhana, seperti nitrat, melalui proses nitrifikasi (Hidayah *et al.*, 2018). Nitrifikasi berlangsung pada suasana aerobik dengan mengubah senyawa amonia (NH_4^+) menjadi senyawa nitrit (NO_2^-). Selanjutnya nitrit dioksidasi menjadi senyawa nitrat (NO_3^-) (Lim, 2024). Mikroorganisme aerobik *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* berperan sebagai agen pengoksidasi amonia menjadi nitrit serta nitrit menjadi nitrat. Nitrifikasi berlangsung melalui dua tahap. Tahap pertama berupa tahap nitritasi untuk mengoksidasi senyawa amonia menjadi nitrit oleh bakteri *Nitrosomonas* berdasarkan reaksi kimia:

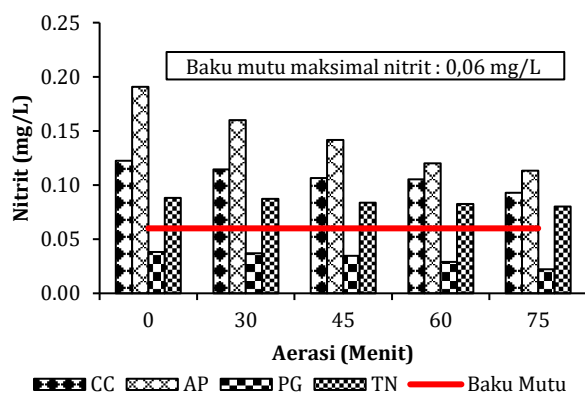


Selanjutnya tahap kedua adalah tahap nitrase yang mengoksidasi senyawa nitrit menjadi nitrat oleh bakteri *Nitrobacter* menurut reaksi kimia berikut.



Nitrobacter membutuhkan lebih banyak waktu untuk mengonversi nitrit menjadi nitrat pada sampel AP (J. Wang *et al.*, 2020).

Semakin panjang waktu aerasi, suplai oksigen dalam ke dalam air semakin banyak sehingga penurunan kadar nitrit akan semakin besar melalui proses biodegradasi (Rivai *et al.*, 2022). Proses biodegradasi akan lebih efektif pada kondisi temperatur dan pH yang optimal untuk mendukung proses metabolisme oleh mikroorganisme aerobik. Pertumbuhan mikroorganisme aerobik lebih optimal terjadi pada rentang nilai pH sebesar 6,5 – 7,5 dan temperatur sebesar 25–35° (Hermanus *et al.*, 2015; Indrayani dan Rahmah, 2018).



Gambar 9. Nitrit air limpasan green roof

3.8. Status Mutu Air Limpasan Green Roof

Baku mutu berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VI tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan

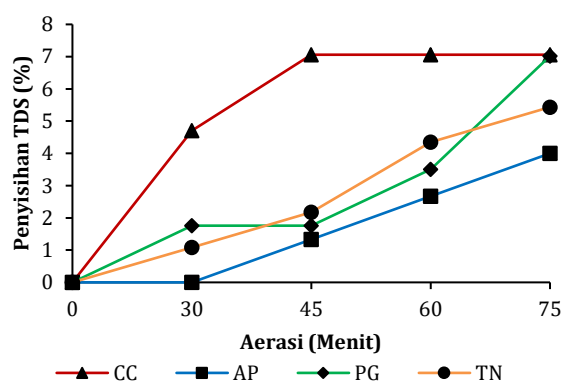
Lingkungan Hidup Baku Mutu Air Kelas II mencakup semua parameter yang diuji, yaitu temperatur, TDS, pH, DO, COD, amonia, dan nitrit. Berdasarkan penentuan status mutu air sebelum perlakuan aerasi menggunakan MB (0 menit), konsentrasi DO terkecil tidak memenuhi standar baku mutu sehingga diberikan nilai -2 (Tabel 1). Konsentrasi amonia tertinggi tidak memenuhi standar baku mutu sehingga diberikan nilai -2. Konsentrasi COD dan nitrit maksimum dan rata-rata tidak memenuhi baku mutu sehingga diberi nilai -8. Dengan demikian, status mutu air sebelum perlakuan aerasi menggunakan MB (0 menit) adalah Kelas C atau tercemar sedang dengan nilai STORET -20 (Tabel 1). Selain itu, penentuan status mutu air setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 30 dan 45 menit menunjukkan konsentrasi COD dan nitrit maksimum dan rata-rata tidak memenuhi baku mutu sehingga diberi nilai -8 (Tabel 1) sehingga dapat ditentukan status mutu air adalah Kelas C atau tercemar sedang untuk masing-masing perlakuan dengan nilai STORET -16 (Tabel 1).

Tren berbeda terjadi pada perlakuan aerasi menggunakan MB selama 60 dan 75 menit. Penentuan status mutu air setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 60 menit berdasarkan baku mutu Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VI untuk konsentrasi COD dan nitrit maksimum dan rata-rata tidak memenuhi baku mutu sehingga diberi nilai -8 (Tabel 1). Selain itu, nilai konsentrasi COD dan nitrit rata-rata dan maksimum untuk perlakuan aerasi menggunakan MB selama 75 menit berturut-turut dihasilkan nilai STORET sebesar -2 dan -8. Dengan demikian, status mutu air setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 60 dan 75 menit berturut-turut adalah Kelas C atau tercemar sedang dengan nilai STORET sebesar -16 dan Kelas B atau tercemar ringan dengan nilai STORET sebesar -10 (Tabel 1).

Nilai STORET parameter DO mengalami peningkatan dari -2 menjadi 0 setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 30 menit, sedangkan nilai STORET parameter COD baru mengalami peningkatan dari -8 menjadi -2 setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 75 menit. Hal ini dapat terjadi karena konsentrasi DO minimal, maksimal dan rata-rata telah melampaui batas minimum nilai baku mutu sebesar 4 mg/L. Sementara itu, konsentrasi COD maksimal dan rata-rata mulai turun di bawah nilai baku mutu maksimal sebesar 25 mg/L setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 75 menit, sedangkan konsentrasi COD minimum telah turun di bawah nilai baku mutu maksimal sejak perlakuan aerasi menggunakan MB selama 30 menit hingga 75 menit. Faktor inilah akan memengaruhi perbedaan waktu peningkatan nilai STORET pada parameter DO dan COD.

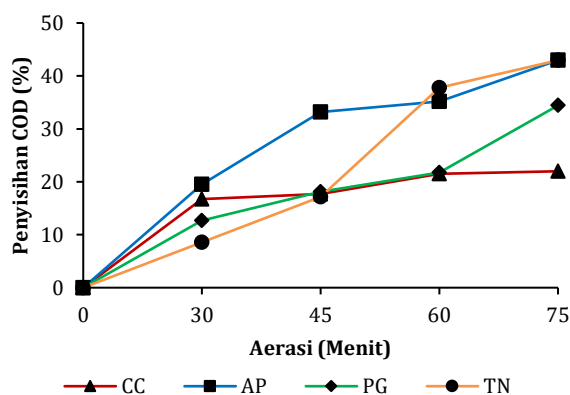
3.9. Persentase Penyisihan TDS, COD, Amonia dan Nitrit

Pemberian aerasi menggunakan MB menunjukkan adanya tren kenaikan penyisihan kandungan TDS, COD, amonia dan nitrit. Tren kenaikan tersebut terjadi pada keempat sampel air limpasan *green roof* setelah perlakuan aerasi selama 75 menit. Pada keempat sampel terlihat bahwa persentase penyisihan TDS cenderung meningkat seiring dengan lamanya perlakuan aerasi (Gambar 10). Persentase penyisihan TDS mencapai rentang nilai 4 – 7,1%. Kenaikan persentase penyisihan terbesar pada sampel CC sebesar 7,1% pada perlakuan aerasi selama 75 menit (Gambar 10). Hasil kenaikan persentase penyisihan TDS ini menunjukkan semakin lama pemberian aerasi maka konsentrasi TDS pada air limpasan *green roof* dapat dikurangi (Royani, 2020).



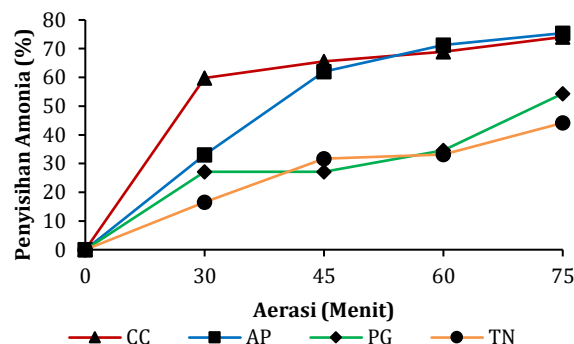
Gambar 10. Persentase Efektivitas Penyisihan TDS

Persentase penyisihan COD mencapai rentang nilai 22 – 43% (Gambar 11). Kenaikan persentase penyisihan COD terbesar pada sampel AP yaitu sebesar 43% pada perlakuan aerasi selama 75 menit (Gambar 11). Hasil kenaikan persentase penyisihan COD ini menunjukkan bahwa penambahan kadar oksigen dalam air limbah membuat pertumbuhan dan jumlah mikroorganisme berbanding lurus dengan proses biodegradasi (Rahmawan *et al.*, 2023).

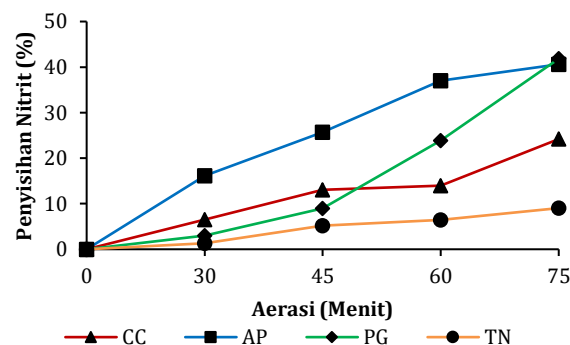


Gambar 11. Persentase Efektivitas Penyisihan COD

Persentase penyisihan amonia mencapai rentang nilai 44,2 – 75,4%; sedangkan persentase penyisihan nitrit mencapai rentang nilai 9 – 41,8% (Gambar 12 dan Gambar 13). Pada perlakuan aerasi selama 75 menit, kenaikan persentase penyisihan amonia dan nitrit terbesar berturut-turut sebesar 75,4% pada sampel AP dan 41,8% pada sampel PG (Gambar 12 dan Gambar 13). Hasil kenaikan persentase penyisihan amonia dan nitrit ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu aerasi, suplai oksigen dalam air akan semakin meningkat sehingga penurunan konsentrasi amonia dan nitrit akan semakin besar (Rivai *et al.*, 2022).



Gambar 12. Persentase Efektivitas Penyisihan Amonia



Gambar 13. Persentase Efektivitas Penyisihan Nitrit

Besar rentang persentase penyisihan dinyatakan berdasarkan nilai persentase penyisihan keempat sampel setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 75 menit. Meskipun persentase penyisihan nitrit mengalami peningkatan hingga 41,8% setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 75 menit. Namun, nilai STORET stagnan pada skor -8. Hal ini dapat terjadi karena nilai konsentrasi nitrit maksimal dan rata-rata belum turun di bawah nilai baku mutu maksimal sebesar 0,06 mg/L hingga setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 75 menit, sedangkan nilai konsentrasi nitrit minimal telah berada di bawah nilai baku mutu maksimal sejak perlakuan aerasi menggunakan MB selama 30 menit hingga 75 menit. Dengan demikian, nilai STORET nitrit tidak berubah meskipun persentase penyisihannya mengalami peningkatan.

Tabel 1. Nilai STORET Sebelum dan Setelah Perlakuan Aerasi MB

Aerasi (menit)	Parameter	Satuan	Baku Mutu	Hasil Pengukuran			Skor STORET
			PP No. 22 Th. 2021	Min.	Maks.	Rata-rata	
0	FISIKA						
	Temperatur	°C	±3 suhu udara	29,00	31,50	30,15	0
	TDS	ppm	1000	57,00	92,00	77,25	0
	KIMIA						
	pH		6,5–8,5	7,06	7,18	7,11	0
	DO	mg/L	4	3,6	5,2	4,6	-2
	COD	mg/L	25	19,4	79,27	35,41	-8
	Amonia	mg/L	0,2	0,042	0,346	0,161	-2
	Nitrit	mg/L	0,06	0,038	0,191	0,11	-8
	TOTAL						-20
Kelas						C	
Status						Cemar Sedang	
30	FISIKA						
	Temperatur	°C	±3 suhu udara	30,00	31,90	30,90	0
	TDS	ppm	1000	56,00	91,00	75,75	0
	KIMIA						
	pH		6,5–8,5	7,1	7,26	7,18	0
	DO	mg/L	4	5,2	6,8	6,175	0
	COD	mg/L	25	15,61	66,01	30,01	-8
	Amonia	mg/L	0,2	0,03	0,132	0,058	0
	Nitrit	mg/L	0,06	0,037	0,16	0,1	-8
	TOTAL						-16
Kelas						C	
Status						Cemar Sedang	
45	FISIKA						
	Temperatur	°C	±3 suhu udara	31,00	32,20	31,48	0
	TDS	ppm	1000	56,00	90,00	74,75	0
	KIMIA						
	pH		6,5–8,5	7,18	7,26	7,21	0
	DO	mg/L	4	5,5	7,9	6,65	0
	COD	mg/L	25	12,96	65,25	28,4	-8
	Amonia	mg/L	0,2	0,03	0,132	0,069	0
	Nitrit	mg/L	0,06	0,035	0,142	0,092	-8
	TOTAL						-16
Kelas						C	
Status						Cemar Sedang	
60	FISIKA						
	Temperatur	°C	±3 suhu udara	31,80	32,40	32,13	0
	TDS	ppm	1000	55,00	88,00	73,75	0
	KIMIA						
	pH		6,5–8,5	7,26	7,38	7,31	0
	DO	mg/L	4	7,4	8,4	7,675	0
	COD	mg/L	25	12,58	62,22	26,22	-8
	Amonia	mg/L	0,2	0,027	0,1	0,058	0
	Nitrit	mg/L	0,06	0,029	0,12	0,084	-8
	TOTAL						-16
Kelas						C	
Status						Cemar Sedang	
75	FISIKA						
	Temperatur	°C	±3 suhu udara	32,20	32,80	32,50	0
	TDS	ppm	1000	53,00	87,00	72,75	0
	KIMIA						
	pH		6,5–8,5	7,26	7,54	7,37	0
	DO	mg/L	4	7,4	8,5	7,875	0
	COD	mg/L	25	11,06	61,84	24,8	-2
	Amonia	mg/L	0,2	0,019	0,085	0,048	0
	Nitrit	mg/L	0,06	0,022	0,113	0,077	-8
	TOTAL						-10
Kelas						B	
Status						Cemar Ringan	

3.10. Strategi Optimalisasi Pengolahan Air Limpasan Green Roof melalui Pendekatan Ekonomis

Berdasarkan analisis kualitas air dan status mutu air, aerasi menggunakan teknologi MB selama 75 menit telah berhasil meningkatkan kualitas air limpasan *green roof*. Namun, air tersebut masih berada dalam status Kelas B (tercemar ringan) dengan skor STORET -10. Untuk peningkatan kualitas air dari status tercemar ringan menjadi tidak tercemar (Kelas A), beberapa solusi dan langkah-langkah perbaikan perlu diimplementasikan secara komprehensif melalui pertimbangan aspek ekonomi, terutama terkait durasi operasi MB yang dijalankan secara kontinu.

Peningkatan durasi aerasi menggunakan teknologi MB merupakan salah satu cara utama untuk mencapai peningkatan kualitas air. Namun, apabila waktu aerasi diperpanjang hingga 90 atau 120 menit, biaya operasional secara signifikan akan meningkat karena penggunaan energi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, solusi melalui pendekatan lebih ekonomis diperlukan melalui implementasi proses aerasi berurutan (*sequential aeration*). Proses ini melibatkan beberapa tahap aerasi dengan durasi lebih pendek pada setiap tahapnya. Strategi ini dapat meningkatkan efektivitas penyisihan kontaminan tanpa peningkatan signifikan dalam biaya energi karena setiap tahap aerasi akan mempercepat proses biodegradasi kontaminan air secara bertahap dan efisien (Man *et al.*, 2018).

Optimalisasi teknologi MB juga dapat memberikan dampak signifikan tanpa harus memperpanjang durasi aerasi. Optimalisasi ukuran dan distribusi MB akan meningkatkan interaksi dengan kontaminan sehingga proses penyisihan menjadi lebih efisien. Distribusi yang merata dari MB selama proses aerasi akan memperbaiki waktu kontak dan efisiensi reaksi (Hu dan Xia, 2018). Selain itu, peningkatan laju transfer oksigen dengan menggunakan generator MB yang lebih efisien atau meningkatkan laju aliran udara akan mempercepat biodegradasi kontaminan tanpa peningkatan signifikan dalam durasi operasi (Hu dan Xia, 2018). Optimalisasi ini membutuhkan penelitian dan pengembangan teknologi MB lanjutan untuk menemukan parameter operasional yang paling efisien.

Penggabungan metode pengolahan lanjutan dengan aerasi MB juga merupakan strategi yang efektif dan ekonomis. Penggunaan kombinasi MB dengan metode pengolahan seperti filtrasi karbon aktif, ozonisasi, atau proses oksidasi lanjutan (AOPs) dapat meningkatkan penyisihan kontaminan yang persisten dengan biaya operasional yang lebih terkendali. Misalnya, filtrasi karbon aktif dapat secara efektif mengadsorpsi bahan organik dan logam berat yang mungkin tidak sepenuhnya diuraikan oleh aerasi MB (Thinojah dan Ketheesan, 2022). Ozonisasi dan AOPs melalui penggunaan ozon atau radikal bebas untuk mengoksidasi polutan dapat digunakan sebagai tahap akhir pengolahan untuk memastikan penyisihan kontaminan yang lebih sulit diuraikan (Xia

dan Hu, 2018). Kombinasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pengolahan tetapi juga mengurangi ketergantungan pada satu metode pengolahan saja.

Peningkatan proses pengolahan biologis dengan menambahkan strain mikroorganisme spesifik yang efektif dalam menguraikan COD dan mengkonversi nitrit menjadi nitrat juga dapat meningkatkan efisiensi pengolahan tanpa memerlukan durasi aerasi yang lebih lama (Kang dan Kim, 2021). Mikroorganisme ini dapat ditambahkan ke dalam sistem pengolahan untuk meningkatkan laju biodegradasi kontaminan. Strain mikroorganisme yang dipilih harus memiliki kemampuan adaptasi terbaik terhadap kondisi lingkungan di *green roof* dan dapat bekerja secara efisien dalam kondisi aerasi yang ada.

Perbaikan vegetasi dan media tanam di *green roof* juga penting untuk mencapai solusi yang ekonomis. Pemilihan tanaman yang memiliki kapasitas tinggi dalam menyerap nutrisi dan menghilangkan polutan dapat membantu mengurangi TDS dan kontaminan lainnya tanpa biaya tambahan yang besar. Tanaman seperti *Canna indica* atau *Typha latifolia*, yang dikenal memiliki sifat fitoremediasi yang baik, dapat dipertimbangkan. Tanaman-tanaman ini mampu menyerap logam berat dan bahan organik dari air limpasan sehingga mengurangi beban polutan yang harus diolah oleh sistem aerasi (Zorai *et al.*, 2023). Selain itu, penggunaan media tanam yang memiliki kapasitas adsorpsi tinggi untuk polutan, seperti campuran karbon aktif dan zeolit, dapat meningkatkan filtrasi dan adsorpsi kontaminan dari air limpasan dengan biaya yang relatif rendah. Media tanam ini dapat memperpanjang umur sistem pengolahan dan mengurangi kebutuhan untuk penggantian media yang sering.

Pengawasan dan penyesuaian yang rutin juga menjadi kunci keberhasilan yang ekonomis. Implementasi sistem pemantauan kualitas air untuk mengukur parameter kualitas air secara reguler akan membantu dalam melakukan penyesuaian proses pengolahan secara *real-time*. Sistem pemantauan ini harus mencakup sensor-sensor yang dapat mengukur parameter seperti pH, DO, COD, TDS, amonia, dan nitrit secara kontinu. Manajemen adaptif yang terus-menerus berdasarkan data pemantauan akan memastikan kinerja optimal dan kepatuhan terhadap standar Kelas A (memenuhi baku mutu) tanpa perlu memperpanjang durasi operasi MB secara signifikan. Penyesuaian yang cepat dan tepat berdasarkan data pemantauan akan mengurangi biaya operasional dengan menghindari penggunaan energi yang berlebihan.

4. KESIMPULAN

Penggunaan MB sebagai aerator pada perlakuan aerasi selama 30, 45, 60 dan 75 menit memiliki pengaruh terhadap parameter temperatur, TDS, pH, DO, COD, amonia dan nitrit pada sampel air limpasan *green roof* dari empat perlakuan berupa tanpa

vegetasi dan dengan vegetasi menggunakan lili paris, krokot mawar, dan kacang hias. Berdasarkan baku mutu yang disyaratkan oleh PP Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VI Baku Mutu Air Kelas II, parameter temperatur, TDS, pH, DO, dan amonia pada empat sampel air limpasan *green roof* telah memenuhi baku mutu. Parameter nitrit pada sampel lili paris, kacang hias, dan tanpa vegetasi masih belum memenuhi batas maksimum baku mutu, sedangkan parameter COD pada lili paris belum memenuhi batas masimum baku mutu. Hanya sampel krokot mawar yang telah memenuhi syarat.

Status mutu air limpasan *green roof* setelah perlakuan aerasi menggunakan MB selama 75 menit berubah dari Kelas C atau tercemar sedang menjadi Kelas B atau tercemar ringan dengan nilai STORET - 10. Efektivitas penyisihan TDS, COD, amonia dan nitrit terbesar dihasilkan setelah aerasi dijalankan selama 75 menit dengan nilai berturut-turut sebesar 7,06%, 17,43%, 75,42% dan 41,84%. Nilai efisiensi penyisihan pada waktu pengoperasian MB selama 75 menit tersebut ditunjukkan dengan perubahan status mutu air limpasan *green roof* dengan kelas B (tercemar ringan) berdasarkan US-EPA. Melalui peningkatan durasi aerasi MB secara optimal, penggabungan metode pengolahan lanjutan yang efektif, perbaikan atau opsi alternatif jenis vegetasi dan media tanam lain, serta penerapan sistem pemantauan yang kontinu, kualitas air limpasan *green roof* dapat ditingkatkan dari status Kelas B menjadi Kelas A (memenuhi baku mutu). Langkah-langkah ini akan memastikan bahwa air hujan yang diolah memenuhi standar tertinggi kebersihan dan keselamatan untuk penggunaan kembali atau pembuangan dengan biaya operasional yang efisien.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai dari Skema Riset Fundamental Institut Pertanian Bogor Nomor 459/IT3.D10/PT.01.03/P/B/2023.

DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, A., Ng, W. J., dan Liu, Y. (2011). Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere*, 84(9), 1175–1180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.054>
- Agustia, S., C. Wirasembada, Y., K. Saptomo, S., dan Chadirin, Y. (2017). Analisis kualitas air hujan dan air limpasan melalui media pasir dan zeolit pada *green roof* berdasarkan parameter fisika dan kimia. 113–121.
- Ahmadi, M., Doroodmand, M. M., Nabi Bidhendi, G., Torabian, A., dan Mehrdadi, N. (2022). Efficient wastewater treatment via aeration through a novel nanobubble system in sequence batch reactors. *Frontiers in Energy Research*, 10(September), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.884353>
- Azevedo, A., Oliveira, H., dan Rubio, J. (2019). Bulk nanobubbles in the mineral and environmental areas: Updating research and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 271, 101992. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.101992>

- Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36(4), 351–360.
- Chozin, M. A., Nuryana, F. I., Guntoro, D., Sumiahadi, A., Badriyah, R. N., dan Wibowo, A. P. (2018). Potency of arachis pinto krap. dan greg. as biomulch in the tropical upland agriculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 196(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/196/1/012011>
- Deendarlianto, Wiratni, Tontowi, A. E., Indarto, dan Iriawan, A. G. W. (2015). The implementation of a developed microbubble generator on the aerobic wastewater treatment. *International Journal of Technology*, 6(6), 924–930. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v6i6.1696>
- del Álamo, A. C., Pariente, M. I., Molina, R., dan Martínez, F. (2022). Advanced bio-oxidation of fungal mixed cultures immobilized on rotating biological contactors for the removal of pharmaceutical micropollutants in a real hospital wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 425(December 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128002>
- Drewnowski, J., Remiszewska-Skwarek, A., Duda, S., dan Łagód, G. (2019). Aeration process in bioreactors as the main energy consumer in a wastewater treatment plant. Review of solutions and methods of process optimization. *Processes*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/pr7050311>
- Dusza, Y., Barot, S., Kraepiel, Y., Lata, J.-C., Abbadie, L., dan Raynaud, X. (2017). Multifunctionality is affected by interactions between green roof plant species, substrate depth, and substrate type. *Ecology and Evolution*, 7(7), 2357–2369.
- El-sherbeny, T. M. S., Mousa, A. M., dan Zhuran, M. A. (2023). Response of peanut (*Arachis hypogaea* L.) plant to bio-fertilizer and plant residues in sandy soil. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(2), 253–265. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01302-z>
- Enagbonma, B. J., Fadiji, A. E., Ayangbenro, A. S., dan Babalola, O. O. (2023). Communication between Plants and Rhizosphere Microbiome: Exploring the Root Microbiome for Sustainable Agriculture. *Microorganisms*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/microorganisms11082003>
- Fan, W., Li, Y., Lyu, T., Chen, Z., Jarvis, P., Huo, Y., Xiao, D., Huo, M., dan others. (2023). A modelling approach to explore the optimum bubble size for micro-nanobubble aeration. *Water Research*, 228, 119360.
- Febiyanto, F. (2020). Effects of temperature and aeration on the dissolved oxygen (do) values in freshwater using simple water bath reactor: a brief report. *Walisono Journal of Chemistry*, 3(1), 25. <https://doi.org/10.21580/wjc.v3i1.6108>
- Furia, E., Beneduci, A., Malacaria, L., Fazio, A., La Torre, C., dan Plastina, P. (2021). Modeling the solubility of phenolic acids in aqueous media at 37 ° c. *Molecules*, 26(21). <https://doi.org/10.3390/molecules26216500>
- Han, Y., Feng, G., dan Ouyang, Y. (2018). Effects of soil and water conservation practices on runoff, sediment and nutrient losses. *Water (Switzerland)*, 10(10), 1–13. <https://doi.org/10.3390/w10101333>
- Harfadli, M. M. (2019). Estimasi koefisien transfer oksigen (kla) pada metode aerasi fine bubble diffuser. studi kasus: pengolahan air lindi tpa manggar kota Balikpapan. *JST (Jurnal Sains Terapan)*, 5(2). <https://doi.org/10.32487/jst.v5i2.662>

- Mahendra, I. B. M., Luthfi, A., Jati, A. C., Kurniawan, A. dan Chadirin, Y. (2025). Pengaruh Durasi Penggunaan Micro Bubble Terhadap Kualitas Air Limpasan Green Roof Ekstensif Berdasarkan Variasi Vegetasi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(x3), 830-844, doi:10.14710/jil.23.3.830-844
- Hartini, E. (2012). Cascade aerator dan bubble aerator dalam menurunkan kadar mangan air sumur gali. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 8(1), 41-50.
- Heriyati, E., Rustadi, R., Isnansetyo, A., dan Triyatno, B. (2020). Uji aerasi microbubble dalam menentukan kualitas air, nilai nutrition value coefficient (nvc), faktor kondisi (k) dan performa pada budidaya nila merah (*oreochromis sp.*). *Jurnal Pertanian Terpadu*, 8(1), 27-41. <https://doi.org/10.36084/jpt.v8i1.232>
- Hermanus, M. B., Polii, B., dan Mandey, L. C. (2015). Aerob and anaerob treatments to bod, cod, ph, and dominant of bacteria of desiccated coconut industry wastewater of pt. global coconut, radey, south minahasa. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Pangan*, 3(2), 48-59.
- Hidayah, E. N., Djalalembah, A., Asmar, G. A., dan Cahyonugroho, O. H. (2018). Pengaruh aerasi dalam constructed wetland pada pengolahan air limbah domestik. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 16(2), 155. <https://doi.org/10.14710/jil.16.2.155-161>
- Hu, L., dan Xia, Z. (2018). Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 342, 446-453. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.030>
- Indrayani, L., dan Rahmah, N. (2018). Nilai Parameter Kadar pencemar sebagai penentu tingkat efektivitas tahapan pengolahan limbah cair industri batik. *Jurnal Rekayasa Proses*, 12(1), 41. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.35754>
- Irfan, M., Waqas, S., Khan, J. A., Rahman, S., Kruszelnicka, I., Ginter-Kramarczyk, D., Legutko, S., Ochowiak, M., Włodarczyk, S., dan Czernek, K. (2022). Effect of operating parameters and energy expenditure on the biological performance of rotating biological contactor for wastewater treatment. *Energies*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/en15103523>
- Jayanthi, S., dan Arico, Z. (2017). Pengaruh kerapatan vegetasi terhadap produktivitas serasah hutan taman nasional gunung leuser. *Elkawnie*, 3(2), 151-160. <https://doi.org/10.22373/ekw.v3i2.1888>
- Kang, D., dan Kim, K. (2021). Real wastewater treatment using a moving bed and wastewater-borne algal-bacterial consortia with a short hydraulic retention time. *Processes*, 9(1), 1-15. <https://doi.org/10.3390/pr9010116>
- Khan, P., Zhu, W., Huang, F., Gao, W., dan Khan, N. A. (2020). Micro-nanobubble technology and water-related application. *Water Science and Technology: Water Supply*, 20(6), 2021-2035. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.121>
- Kustiyaningsih, E., dan Irawanto, R. (2020). Pengukuran total dissolved solid (tds) dalam fitoremediasi deterjen dengan tumbuhan sagittaria lancifolia. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 7(1), 143-148. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2020.007.1.18>
- Kusuma, Y. R., dan Yanti, I. (2021). Effect of water content in soil on c-organic levels and soil acidity (pH). *Indonesian Journal of Chemical Research*, 6(2), 92-97.
- Lim, C. Y. (2024). *Constructed wetland for wastewater treatment*. UTAR.
- Liu, B., Wang, W. lin, Han, R. ming, Sheng, M., Ye, L. lin, Du, X., Wu, X. ting, dan Wang, G. xiang. (2016). Dynamics of dissolved oxygen and the affecting factors in sediment of polluted urban rivers under aeration treatment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227(6). <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2869-0>
- Lusiana, N., Widiatmono, B. R., dan Luthfiyana, H. (2020). Beban pencemaran bod dan karakteristik oksigen terlarut di sungai brantas kota malang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(2), 354-366. <https://doi.org/10.14710/jil.18.2.354-366>
- Lv, J., dan Wu, Y. (2021). Nitrogen removal by different riparian vegetation buffer strips with different stand densities and widths. *Water Supply*, 21(7), 3541-3556. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.119>
- Made Joni, I., Subhan, U., Hanam, E. S., Azhary, S. Y., Pratopo, L. H., Hermawan, W., Miranti, M., dan Panatarani, C. (2020). Application of fine bubbles technology in wastewater treatment plant (WWTP) for aquaculture system. *AIP Conference Proceedings*, 2219(May). <https://doi.org/10.1063/5.0003078>
- Man, Y., Shen, W., Chen, X., Long, Z., dan Corriou, J. P. (2018). Dissolved oxygen control strategies for the industrial sequencing batch reactor of the wastewater treatment process in the papermaking industry. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 4(5), 654-662. <https://doi.org/10.1039/c8ew00035b>
- Manik, A. S. I., Saptomo, S. K., dan Chadirin, Y. (2024). Rancangan sumur resapan pada bangunan hunian vertikal sebagai implementasi kriteria greenbuilding. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 9(01), 93-104. <https://doi.org/10.29244/jsil.9.1.93-104>
- Mawarni, D. I., dan Suryani, P. E. (2023). Kaji Eksperimental pengolahan air limbah "grey water" dengan menggunakan teknologi microbubble generator sebagai aerator. *Jurnal Crankshaft*, 6(3), 105-110. <https://jurnal.umk.ac.id/index.php/cra/article/view/11359>
- Mubarak, M. (2018). Simulation of surface runoff reduction in urban buffer area using green roof system. *Jurnal Sains Dan Teknologi Mitigasi Bencana*, 13(1), 24-33.
- Munfaridah, A., Saraswati, S. P., dan Mahathir, J. S. (2022). Pengaruh sistem aerasi intermittent terhadap removal organik dan nitrogen pada pengolahan air limbah domestik kamar mandi umum. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(1), 102-114. <https://doi.org/10.14710/jil.20.1.102-114>
- Pramleonia, M., Yuliani, N., Arizal, R., dan Wardoyo, S. E. (2018). Parameter fisika dan kimia air kolam ikan nila hitam (*oreochromis niloticus*). *Jurnal Sains Natural*, 8(1), 24-34. <https://doi.org/10.31938/jsn.v8i1.107>
- Rahmawan, M. F., Pramitasari, N., dan Kartini, A. M. (2023). Pengaruh aerasi terhadap penurunan kadar cod limbah cair laundry pada proses fitotreatment menggunakan tanaman eceng gondok (*eichhornia crassipes*). *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 15(1), 89-105. <https://doi.org/10.20885/jstl.vol15.iss1.art7>
- Rivai, V., Wulandari, C. D. R., dan Setyobudiarso, H. (2022). Efektivitas metode aerasi bubble aerator dalam menurunkan kadar bod dan cod air limbah rps laundry kota malang. *Jurnal Mahasiswa" ENVIRO"*, 1(2), 1-8.
- Rosalina, F., dan Maipauw, N. J. (2019). Sifat kimia tanah pada beberapa tipe vegetasi. *J. Med.*, 11(1), 1-9.
- Royani, A. (2020). Pengaruh suhu terhadap laju korosi baja karbon rendah dalam media air laut. *Jurnal Simetrik*, 10(2), 344-349.
- Shafique, M., Kim, R., dan Kyung-Ho, K. (2018). Green roof for stormwater management in a highly urbanized area: The case of Seoul, Korea. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3), 1-14. <https://doi.org/10.3390/su10030584>
- Shafique, M., Kim, R., dan Rafiq, M. (2018). Green roof

- benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90(April 2017), 757–773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>
- Stovin, V., Vesuviano, G., dan Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414, 148–161.
- Terry, J. A., Sadeghian, A., dan Lindenschmidt, K. E. (2017). Modelling dissolved oxygen/sediment oxygen demand under ice in a shallow eutrophic prairie reservoir. *Water (Switzerland)*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/w9020131>
- Thinojah, T., dan Ketheesan, B. (2022). Iron removal from groundwater using granular activated carbon filters by oxidation coupled with the adsorption process. *Journal of Water and Climate Change*, 13(5), 1985–1994. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.126>
- Vijayaraghavan, K., dan Raja, F. D. (2014). Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption. *Water Research*, 63, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.012>
- Virha, F. A., Bastamansyah, dan Bayfurqon, F. M. (2020). Pengaruh sistem aerasi dan pemangkasan akar terhadap produksi bayam merah (*Amaranthus Tricolor L.*) pada hidroponik rakit apung. *Agrotekma*, 5(1), 82–91.
- Wang, H., dan Zhang, L. (2017). Research on the nitrogen removal efficiency and mechanism of deep subsurface wastewater infiltration systems by fine bubble aeration. *Ecological Engineering*, 107, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.005>
- Wang, J., Yang, H., Liu, X., Wang, J., dan Chang, J. (2020). The impact of temperature and dissolved oxygen (DO) on the partial nitrification of immobilized fillers, and application in municipal wastewater. *RSC Advances*, 10(61), 37194–37201. <https://doi.org/10.1039/d0ra05908k>
- Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., dan Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, 184, 594–600. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.025>
- Wei, X., Lyu, S., Yu, Y., Wang, Z., Liu, H., Pan, D., dan Chen, J. (2017). Phylloremediation of air pollutants: Exploiting the potential of plant leaves and leaf-associated microbes. *Frontiers in Plant Science*, 8(2), 1–23. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01318>
- Xia, Z., dan Hu, L. (2018). Treatment of organics contaminated wastewater by ozone micro-nano-bubbles. *Water (Switzerland)*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/w11010055>
- Yuniarti, D. P., Komala, R., dan Aziz, S. (2019). Pengaruh proses aerasi terhadap pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit di pt pn vii secara aerobik. *Jurnal Redoks*, 4(2), 7–16. <https://doi.org/10.31851/redoks.v4i2.3504>
- Zhang, H., Lyu, T., Bi, L., Tempero, G., Hamilton, D. P., dan Pan, G. (2018). Combating hypoxia/anoxia at sediment-water interfaces: A preliminary study of oxygen nanobubble modified clay materials. *Science of the Total Environment*, 637–638, 550–560. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.284>
- Zilmy, D. O., Utomo, K. P., dan Kadaria, U. (2022). Pengaruh koefisien transfer gas (kla) terhadap penurunan parameter besi (fe) dalam air sumur gali menggunakan multiple tray aerator. *Jurnal Rekayasa Lingkungan Tropis*, 3(1), 91–100.
- Zorai, A., Benzahi, K., Labed, B., Ouakouak, A., Serraooui, M., dan Bouhoreira, A. (2023). Performance of *Canna indica* and *Typha latifolia* in mono and mixed culture for secondary wastewater treatment in constructed wetlands with vertical flows under arid conditions (Touggourt, Algeria). *Water Practice and Technology*, 18(1), 53–67. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.163>