@Hak cipta milik IPB University

PENGOLAHAN AIR LIMBAH DOMESTIK (*GREYWATER*) MENGGUNAKAN TEKNOLOGI *FLOATING TREATMENT WETLAND* (FTW) DAN *NANOBUBBLE*

ARIEF RAHMAN HAKIM

ILMU PENGELOLAAN SUMBERDAYA ALAM DAN LINGKUNGAN

SEKOLAH PASCASARJANA

INSTITUT PERTANIAN BOGOR

BOGOR

2025

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa usulan tesis dengan judul "Pengolahan Air Limbah Domestik (*Greywater*) Menggunakan Teknologi *Floating Treatment Wetlands* (FTW) *dan Nanobubble*" adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, July 2025

Arief Rahman Hakim
P0502211023

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

RINGKASAN

ARIEF RAHMAN HAKIM. Pengelolaan Limbah Domestik (*Grey Water*) Menggunakan *Floating Treatment Wetland* (FTW) dan *Nanobubble* (NB). Dibimbing oleh ETTY RIANI dan EVI SUSANTI.

Grey water, atau limbah domestik dari dapur, kamar mandi, dan wastafel, mengandung senyawa pencemar seperti lemak, fosfat, nitrat, amonia, dan padatan terlarut. Sebesar 99,7% dari *grey water* adalah air dan sisanya mengandung bahan pencemar yang dapat menimbulkan penyakit dan mengganggu ekosistem perairan. Umumnya, *grey water* dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengolahan, menyebabkan terjadinya pencemaran sungai dan memberikan risiko kesehatan pada masyarakat.

Salah satu teknologi alternatif yang ramah lingkungan untuk pengolahan *grey water* adalah *Floating Treatment Wetland* (FTW). Teknologi ini memanfaatkan tanaman air dan mikroorganisme untuk menyerap polutan melalui proses filtrasi, adsorpsi, dan dekomposisi biologis. Struktur terapung FTW memungkinkan akar tanaman menjulur ke dalam air, menyediakan habitat bagi mikroba dan mempercepat proses pengolahan. Tanaman *Vetiveria zizanioides* dipilih karena daya serap tinggi terhadap nitrogen dan fosfor, ketahanan terhadap kondisi ekstrem, dan kemudahan tumbuh di berbagai wilayah di Indonesia.

Namun, kendala utama dari sistem FTW konvensional adalah rendahnya produksi oksigen terlarut dari fotosintesis vetiver, terutama karena proses fotosintesis hanya aktif saat pagi hari. Rendahnya *Dissolved Oxygen* (DO) dalam air dapat menghambat aktivitas mikroorganisme aerobik yang berperan dalam penguraian senyawa organik dan amonia. Oleh karena itu, dibutuhkan inovasi teknologi yang dapat meningkatkan kandungan oksigen terlarut secara signifikan. Salah satu solusi adalah integrasi aerasi *nanobubbles* (NB) pada sistem FTW, menjadi FTW-*nanobubbles* (FTW-NB).

Aerasi NB memiliki keunggulan berupa ukuran kecil, daya larut tinggi, dan waktu tinggal lebih lama dalam air. NB mampu meningkatkan kandungan DO secara stabil serta membantu mengikat dan mengangkat partikel pencemar ke permukaan. NB menghasilkan *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang berperan dalam proses oksidasi polutan, menciptakan kondisi aerobik yang dapat menunjang proses nitrifikasi dan degradasi polutan. Kombinasi antara FTW dan NB belum banyak diteliti, hal ini menjadikannya topik penelitian yang cukup menarik dan sangat berpotensi dalam meningkatkan performa pengolahan limbah domestik. Integrasi kedua teknologi ini diharapkan tidak hanya menurunkan kadar amonia dan polutan lain secara lebih efektif sebagai upaya pengembangan pengolahan air limbah yang efisien, berkelanjutan, dan mudah diterapkan pada berbagai skala di masyarakat.

Penelitian ini dilaksanakan secara eksperimental di Laboratorium Rumah Kaca, Pusat Riset Limnologi dan Sumber Daya Air (PRLSDA), Komplek Cibinong Science Center, selama enam bulan, dari September 2023 hingga April 2024. Karakterisasi aerator dilakukan di *Advance Characteristic Laboratories*-BRIN Bandung, Jawa Barat. Penelitian menggunakan sistem *batch* dengan sembilan reaktor plastik berukuran 60 × 42,5 × 38 cm³, masing-masing berisi 50 liter air

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

limbah domestik yang bersumber dari aktivitas mandi, cuci tangan, *pantry*, dan *laundry* di sebuah perusahaan swasta di Kabupaten Bogor.

Terdapat tiga perlakuan utama, masing-masing dengan tiga kali ulangan masing-masing reaktor: (1) FTW, (2) NB, dan (3) FTW-NB. Tanaman Vetiveria zizanioides ditanam pada reaktor FTW dan FTW-NB menggunakan media apung (floating mats), sebanyak 11 rumpun pada setiap reaktor dan telah melalui proses aklimatisasi selama dua minggu. Reaktor NB dan FTW-NB dilengkapi dengan NB *generator* menggunakan pompa submersible model 4212A (DC12V, 20W, IPX8, Hmax: 5,0 m, Qmax: 800 L). Parameter kualitas air yang diukur setiap hari meliputi pH, suhu, DO, dan total dissolved solids (TDS) menggunakan Water Quality Checker (WQC). Selain itu, dilakukan analisis kandungan pencemar air seperti amonia (NH_3), nitrat (NO_3^-), fosfat (PO_4^{3-}), total fosfor (TP), total nitrogen (TN), dan chemical oxygen demand (COD).

Sistem FTW dengan tanaman *Vetiveria zizanioides* menunjukkan efisiensi tinggi dalam menurunkan NH_4^+ (100%), PO_4^{3+} (88%), TP (79%), dan COD (70%). Namun, penurunan TN (33%) dan TSS (56%) masih terbatas, serta TDS justru meningkat. Pada FTW peningkatan oksigen terlarut berlangsung relatif lambat yang dihasilkan melalui proses fotosintesis, semula pada konsentrasi 0,92 ± 0,05 mg/L menjadi 3,04 ± 0,45 mg/L pada hari ke-13. Penyerapan fosfat cukup efektif yang dimanfaatkan sebagai nutrien penting bagi tanaman vetiver.

Sistem NB meningkatkan DO yang tinggi dan stabil pada 24 jam pertama dengan peningkatan konsentrasi semula 1,03 ± 0,06 mg/L menjadi 7,72 ± 0,02 mg/L, dengan efisiensi penyisihan TSS (100%), NH_4^+ (100%), PO_4^{3+} (10,5%), TP (18%), TN (23%), dan COD (62%). Sistem ini tidak efektif dalam menurunkan fosfat dan TP.

Integrasi sistem FTW-NB efektif dalam menurunkan NH_4^+ dengan cepat dengan efisiensi sebesar 100% pada hari ke-6. Hal ini disebabkan oleh peningkatan DO yang stabil dan tinggi akibat aerasi NB hingga mencapai 6,64 ± 0,17 mg/L. Efisiensi penurunan parameter lainnya berturut-turut adalah TSS (52%), NH_4^+ (100%), PO_4^{3+} (8%), TP (24%), TN (13%), dan COD (59%) dengan kisaran yang lebih rendah dibandingkan kedua sistem lainnya. Aerasi NB menyebabkan peningkatan suhu hingga 30,49°C, yang dapat mempengaruhi kelarutan DO dan meningkatkan pH. Penggabungan kedua sistem menyebabkan gangguan fisik diantaranya sistem filtrasi pada akar tanaman dan aerasi dapat meningkatnya terlepas kembali padatan terlarut akibat turbulensi, serta diduga mengganggu proses penyerapan fosfor oleh tanaman.

Kata Kunci: Aerasi, gelembung nano, *grey water*, *floating treatment wetland,* pengolahan air limbah domestik, *reactive oxygen species, swirl pump, vetiveria zizanioides*

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

SUMMARY

ARIEF RAHMAN HAKIM. Domestic Waste Management (Grey Water) Using Floating Treatment Wetland (FTW) and Nanobubble (NB). Supervised by ETTY RIANI and EVI SUSANTI.

Grey water, or domestic waste from kitchens, bathrooms, and sinks, contains polluting compounds such as fats, phosphates, nitrates, ammonia, and dissolved solids. As much as 99.7% of grey water is water, and the rest contains pollutants that can cause disease and disrupt aquatic ecosystems. Generally, grey water is discharged directly into the environment without treatment, leading to river pollution and posing health risks to the community.

One environmentally friendly alternative technology for grey water treatment is the Floating Treatment Wetland (FTW). This technology utilizes aquatic plants and microorganisms to absorb pollutants through filtration, adsorption, and biological decomposition processes. The floating structure of FTW allows plant roots to extend into the water, providing a habitat for microbes and accelerating the treatment process. *Vetiveria zizanioides* was chosen due to its high nitrogen and phosphorus absorption, resistance to extreme conditions, and ease of cultivation in various regions of Indonesia.

However, a major constraint of conventional FTW systems is the low dissolved oxygen production from vetiver photosynthesis, especially since the photosynthetic process is only active during the morning hours. Low Dissolved Oxygen (DO) in water can inhibit the activity of aerobic microorganisms that play a role in the decomposition of organic compounds and ammonia. Therefore, technological innovations are needed that can significantly increase dissolved oxygen content. One solution is the integration of nanobubbles (NB) aeration in the FTW system, becoming FTW-nanobubbles (FTW-NB).

NB aeration has the advantages of small size, high dissolving power, and longer residence time in water. NB can increase DO content steadily and help bind and lift contaminant particles to the surface. NB produces Reactive Oxygen Species (ROS) that play a role in the process of pollutant oxidation, creating aerobic conditions that can support the process of nitrification and pollutant degradation. The combination of FTW and NB has not been widely studied, making it an interesting research topic with great potential in improving the performance of domestic sewage treatment. The integration of these two technologies is expected not only to reduce ammonia levels and other pollutants more effectively but also to develop wastewater treatment that is efficient, sustainable, and easy to implement at various scales in the community.

This research was conducted experimentally at the Greenhouse Laboratory, Research Center for Limnology and Water Resources (PRLSDA), Cibinong Science Center Complex, for six months, from September 2023 to April 2024. Aerator characterization was conducted at Advanced Characteristic Laboratories-BRIN Bandung, West Java. The study used a batch system with nine plastic reactors measuring 60 × 42.5 × 38 cm^3, each containing 50 liters of domestic wastewater

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

sourced from bathing, hand washing, pantry, and laundry activities at a private company in Bogor Regency.

There were three main treatments, each with three replications per reactor: (1) FTW, (2) NB, and (3) FTW-NB. *Vetiveria zizanioides* plants were planted in FTW and FTW-NB reactors using floating mats, 11 clumps in each reactor, and had gone through a two-week acclimatization process. The NB and FTW-NB reactors were equipped with an NB generator using a submersible pump model 4212A (DC12V, 20W, IPX8, Hmax: 5.0 m, Qmax: 800 L). Water quality parameters measured daily included pH, temperature, DO, and total dissolved solids (TDS) using a Water Quality Checker (WQC). In addition, water contaminants such as ammonia (NH_3), nitrate (NO_3-), phosphate (PO_4^{3-}), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), and chemical oxygen demand (COD) were analyzed.

The FTW system with *Vetiveria zizanioides* showed high efficiency in reducing NH_4^+ (100%), PO_4^{3-} (88%), TP (79%), and COD (70%). However, the reduction of TN (33%) and TSS (56%) was limited, and TDS increased. In FTW, the increase in dissolved oxygen was relatively slow, produced through photosynthesis, from a concentration of 0.92 ± 0.05 mg/L to 3.04 ± 0.45 mg/L on day 13. Phosphate absorption is quite effective, which is utilized as an important nutrient for vetiver.

The NB system increased high and stable DO in 24 hours with an increase in concentration from 1.03 ± 0.06 mg/L to 7.72 ± 0.02 mg/L, with removal efficiency of TSS (100%), NH_4^+ (100%), PO_4^{3-} (10.5%), TP (18%), TN (23%), and COD (62%). The system was not effective in reducing phosphate and TP.

The FTW-NB system integration was effective in reducing NH_4^+ levels quickly, achieving 100% efficiency by day 6. This was due to the steady and high increase in DO resulting from NB aeration, which reached 6.64 ± 0.17 mg/L. The efficiency of reducing other parameters was TSS (52%), NH_4^+ (100%), PO_4^{3-} (8%), TP (24%), TN (13%), and COD (59%) with a lower range compared to the other two systems. Aeration of NB caused an increase in temperature to 30.49°C, which can affect the solubility of DO and increase pH. The combination of the two systems causes physical disturbances, including the filtration system in plant roots, and aeration can increase the re-release of dissolved solids due to turbulence. It is thought to interfere with the phosphorus absorption process by plants.

Keywords: aeration nanobubbles, floating treatment wetland, grey water, reactive oxygen species, swirl pump, vetiveria zizanioides, water treatment

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

© Hak Cipta Milik IPB, Tahun 2025
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah; dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

PENGOLAHAN AIR LIMBAH DOMESTIK (*GREYWATER*) MENGGUNAKAN TEKNOLOGI *FLOATING TREATMENT WETLAND* (FTW) DAN *NANOBUBBLE*

ARIEF RAHMAN HAKIM

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains pada
Program Studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan

ILMU PENGELOLAAN SUMBERDAYA ALAM DAN LINGKUNGAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

Tim Penguji pada Ujian Tesis:
1. Dr. Ir. Syaiful Anwar M.Sc.

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

Judul Tesis	:	Pengolahan Air Limbah Domestik (*Greywater*) menggunakan Teknologi *Floating Treatment Wetlands (FTW)* dan *Nanobubble*
Nama	:	Arief Rahman Hakim
NIM	:	P0502211023
NIM	:	P0502211023

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. Etty Riani M.S.

Pembimbing 2:

Dr. Evi Susanti, M.T.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi Ilmu Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan:

Prof. Dr. Hadi Susilo Arifin, M.S.

NIP 19591106 198501 1 001

Dekan Sekolah Pascasarjana:

Prof. Dr. Ir. Dodik Ridho Nurrochmat, M.Sc. F.Trop.

NIP 19700329 199608 1 001

Tanggal Ujian: 26 Juli 2025

Tanggal Lulus:

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

PRAKATA

Bismillah, puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *subhanaahu wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Solawat serta salam penulis sampaikan kepada junjungan kita Nabi Muhammad *Salallohu alaihi wassalam* yang mewarisi sumber ilmu pengetahuan kepada kita semua yaitu Al-quran dan Sunnah, semoga ilmu yang beliau wariskan bermanfaat bagi kita dunia dan akhirat. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan September 2023 sampai bulan April 2024 ini mengenai pengolahan air limbah rumah tangga, dengan judul "Pengolahan Limbah Domestik (*Greywater*) menggunakan Teknologi *Floating Treatment Wetlands (FTWs) dan Nanobubble"*.

Selama proses penyusunan tesis ini, penulis mendapat banyak dukungan dan bantuan dari berbagai pihak guna membantu lancarnya penelitian ini, baik secara langsung atau tidak oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Etty Riani M.S. dan Dr. Evi Susanti, MT, selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu, membimbing, dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan penelitian ini,
2. Seluruh dosen dan staf program studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan atas ilmu, pengalaman, dan bimbingan selama menempuh pendidikan,
3. Orang tua, kakak, dan adik, serta keluarga besar atas doa-doanya,
4. Istri terkasih Lulu Ariesiana Arif dan anak-anakku tersayang Salma Nayla Hakim, Ghaisan Barra Hakim dan Laluna Naazneen Hakim atas dukungan dan doanya,
5. Bapak Antonius Marcos Oey Direktur Human Capital PT Indocement Tunggal prakarsa, Tbk. dan
6. Kepada semua pihak terkait yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga penelitian ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Juli 2025
Hormat Saya

Arief Rahman Hakim

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL			xi
DAFTAR GAMBAR			xi
DAFTAR LAMPIRAN			xiii
I	PENDAHULUAN		
	1.1	Latar Belakang	1
	1.2	Rumusan Masalah	2
	1.3	Tujuan	3
	1.4	Manfaat Penelitian	4
	1.5	Ruang Lingkup	4
	1.6	Kerangka Pikir	4
II	TINJAUAN PUSTAKA		
	2.1	Limbah Domestik (*Greywater*)	7
	2.2	Nilai pH atau Derajat Keasaman (pH)	8
	2.3	*Dissolved Oxygen* (DO)	9
	2.4	Kebutuhan Oksigen Biologi *(Biological Oxygen Demand* /BOD)	10
	2.5	Kebutuhan Oksigen Kimiawi (*Chemical Oxygen Demand* /COD)	10
	2.6	Padatan Tersuspensi Total *(Total Suspended Solid* /TSS)	11
	2.7	Total Padatan Terlarut *(Total Dissolved Solid* /TDS)	11
	2.8	Minyak dan Lemak	12
	2.9	Siklus Nitrogen	13
	2.9.1	Amonia (NH_3)	14
	2.9.2	Nitrogen (N_2)	15
	2.9.3	Nitrifikasi	16
	2.10	Total Nitrogen (TN)	17
	2.11	Orthofosfat (PO_4^{3-})	17
	2.12	Total Fosfor (TP)	18
	2.13	Lahan Basah Terapung (*Floating Treatment Wetlands*/FTW)	18
	2.13.1	Struktur FTW	19
	2.13.2	Vegetasi pada sistem FTW	21
	2.13.3	Atribut morfologi dan peran ekologis *Vetiveria zizanioides* dalam pengolahan air	21
	2.13.4	Atribut fisiologis *vetiveria zizanioides*	22
	2.13.5	Karakteristik ekologis	23

	2.14	*Nanobubble* (NB)	23
	2.15	*Nanobubble Generator* (NBG)	26
	2.16	Pengukuran Partikel Gelembung Udara	28
III	METODE PENELITIAN		
	3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	31
	3.2	Bahan dan Alat	31
	3.3	Rancangan Percobaan	31
	3.4	Prosedur Penelitian	31
	3.5	Sistem Pengolahan Air Limbah dengan FTW, NB dan FTW-NB	32
	3.6	Pengumpulan Data	33
	3.7	Kualitas Air	34
	3.8	Analisa Data	35
IV	HASIL DAN PEMBAHASAN		
	4.1	Hasil dan Pembahasan	37
	4.1.1	Uji pompa aerasi *nanobubble*	37
	4.1.2	Uji zeta potential gelembung nano	39
	4.1.3	Data awal kandungan limbah domestik (*greywater*)	39
	4.1.2	Uji zeta potensial *nanobubble*	39
	4.2	Hasil Akhir Percobaan	41
	4.2.1	*Dissolved Oxygen* (DO)	42
	4.2.2	*Potential Hydrogen* (pH)	45
	4.2.3	*Total Dissolved Solid* (TDS)	47
	4.2.4	*Ortophosphate* (PO_4^{3-})	49
	4.2.5	*Total Phosphate* (TP)	52
	4.2.6	*Amonium* (NH_4^+)	54
	4.2.7	*Nitrate* (NO_3)	57
	4.2.8	*Total Nitrogen* (TN)	59
	4.2.9	*Total Suspended Solid* (TSS)	62
	4.2.10	*Chemical Oxygen Demand* (COD)	65
	4.2.11	Pertumbuhan Tanaman	67
V	SIMPULAN DAN SARAN		
	5.1	Simpulan	70
	5.2	Saran	71
DAFTAR PUSTAKA			72
LAMPIRAN			81
RIWAYAT HIDUP			98

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

DAFTAR TABEL

1	Parameter baku mutu pemerintah	7
2	Interpretasi nilai *polydisperse index* (PDI) pada pengukuran menggunakan DLS	29
3	Interpretasi nilai *zeta potential* pada hasil pengukuran gelembung nano	30
4	Interpretasi nilai *zeta deviation* pada hasil pengukuran gelembung nano	30
5	Parameter kualitas air yang diukur	34
6	Hasil kumulatif dan distribusi dari pengujian pompa aerasi	38
7	Data awal (t_0) kandungan limbah *greywater*	40
8	Hasil pengukuran pH, DO, dan suhu secara *insitu* diukur 24 jam selama percobaan	42

DAFTAR GAMBAR

1	Diagram alir kerangka pemikiran	5
2	Siklus nitrogen di lingkungan perairan	13
3	Mekanisme proses di FTW dalam memperbaiki air limbah domestik	20
4	Sistem FTW menggunakan tanaman *Vetiveria zizanioides*	21
5	Gambar perbedaan antara *macrobubbles, microbubbles* dan *nanobubble* di air	24
6	Dimensi antara *macrobubbles, microbubbles* dan *nanobubble* menurut ISO-2480-12017 digambarkan dengan skala ukuran diameter	25
7	Karakteristik fisika dan kimia *nanobubble* di air	26
8	NBG dengan tipe *swirl* atau pusaran dan spesifikasinya	27
9	Konstruksi penelitian dengan menggunakan reaktor FTW (A-B-C), reaktor NB (D-E-F), dan reaktor FTW-NB (G-H-I)	29
10	Skema reaktor percobaan dengan sistem (a)NB, (b) FTW, (c) FTW-NB, dan (d) media tanam (floating pad)	33
11	Proses pengukuran data pH, TDS, DO dan Suhu menggunakan WQM	35
12	Penampakan air limbah domestik saat (a) sebelum dilakukan *treatment* (b) nanobubble aeration pada t=0 dan (c) FTW	33
13	Penyajian data spektrum distribusi ukuran gelembung nano yang dihasilkan oleh pompa aerasi, hasil dari pompa 1, pompa 2, dan pompa 3 hasil dari pengukuran Zetasizer ver. 7.13 Malvern Panalytical	37
14	Nilai zeta potential yang dihasilkan oleh pompa nanobubble yang diukur menggunakan alat Zetasizer ver. 7.13 Malvern Panalytical	39

15	Penampakan air limbah domestik saat (a) sebelum dilakukan treatment (b) nanobubble aeration pada t=0 dan (c) FTW	41
16	Fluktuasi DO selama waktu percobaan pada perlakuan berbeda. Huruf yang berbeda pada grafik menunjukan hasil yang berbeda nyata (F_{hitung} > 5% (F_{tabel}))	43
17	Nilai efisiensi kenaikan DO (%) rata-rata pada sistem perlakuan selama pengamatan	44
18	Fluktuasi pH selama waktu percobaan pada perlakuan berbeda. Huruf yang berbeda pada grafik menunjukan hasil yang berbeda nyata (F_{hitung} > 5% (F_{tabel}))	45
19	Nilai efisiensi kenaikan pH (%) rata-rata pada sistem perlakuan selama pengamatan	46
20	Fluktuasi kandungan TDS selama waktu percobaan pada perlakuan berbeda. Huruf yang berbeda pada grafik menunjukan hasil yang berbeda nyata (F_{hitung} > 5% (F_{tabel}))	47
21	Fluktuasi kandungan PO_4^{3-} selama waktu percobaan pada perlakuan berbeda. Huruf yang berbeda pada grafik menunjukan hasil yang berbeda nyata (F_{hitung} > 5% (F_{tabel}))	50
22	Nilai efisiensi penurunan PO_4^{3-} (%) rata-rata pada sistem perlakuan selama pengamatan	51
23	Fluktuasi kandungan TP selama percobaan pada perlakuan berbeda. Huruf yang berbeda pada grafik menunjukan hasil yang berbeda nyata (F_{hitung} > 5% (F_{tabel}))	52
24	Nilai efisiensi penurunan TP (%) rata-rata pada sistem perlakuan selama pengamatan	54
25	Fluktuasi kandungan NH_4 selama percobaan pada perlakuan berbeda. Huruf yang berbeda pada grafik menunjukan hasil yang berbeda nyata (F_{hitung} > 5% (F_{tabel}))	55
26	Nilai efisiensi penurunan NH_4 (%) rata-rata pada sistem perlakuan selama pengamatan	57
27	Fluktuasi kandungan NO_3 selama percobaan pada perlakuan berbeda. Huruf yang berbeda pada grafik menunjukan hasil yang berbeda nyata (F_{hitung} > 5% (F_{tabel}))	58
28	Fluktuasi kandungan TN selama percobaan pada perlakuan berbeda. Huruf yang berbeda pada grafik menunjukan hasil yang berbeda nyata (F_{hitung} > 5% (F_{tabel}))	60
29	Nilai efisiensi penurunan TN (%) rata-rata pada sistem perlakuan selama pengamatan	62
30	Fluktuasi kandungan TSS selama percobaan pada perlakuan berbeda. Huruf yang berbeda pada grafik menunjukan hasil yang berbeda nyata (F_{hitung} > 5% (F_{tabel}))	63
31	Nilai efisiensi penurunan TSS (%) rata-rata pada sistem perlakuan selama pengamatan	65
32	Fluktuasi nilai COD selama percobaan pada perlakuan berbeda. Huruf yang berbeda pada grafik menunjukan hasil yang berbeda nyata (F_{hitung} > 5% (F_{tabel}))	66
33	Nilai efisiensi penurunan COD (%) rata-rata pada sistem perlakuan selama pengamatan	67

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

34 Pertumbuhan tanaman *Vetiveria zizanioides* dengan standar deviasi (I) pada sistem FTW dan FTW-NB yang dilihat pada masa percobaan 68

DAFTAR LAMPIRAN

1 Tabel uji anova dan uji lanjut Duncan untuk DO 81
2 Tabel uji anova dan uji lanjut Duncan untuk pH 81
3 Tabel uji anova dan uji lanjut Duncan untuk TDS 82
4 Tabel uji anova dan uji lanjut Duncan untuk PO_4^{3-} 82
5 Tabel uji anova dan uji lanjut Duncan untuk TP 83
6 Tabel uji anova dan uji lanjut Duncan untuk NH_4^+ 83
7 Tabel uji anova dan uji lanjut Duncan untuk NO_3^- 84
8 Tabel uji anova dan uji lanjut Duncan untuk TSS 84
9 Tabel uji anova dan uji lanjut Duncan untuk TN 85
10 Tabel uji anova dan uji lanjut Duncan untuk COD 85
11 Data pertumbuhan tanaman *Vetiveria zizanioides* hari ke-0 86
12 Data pertumbuhan tanaman *Vetiveria zizanioides* hari ke-4 87
13 Data pertumbuhan tanaman *Vetiveria zizanioides* hari ke-9 88
14 Data pertumbuhan tanaman *Vetiveria zizanioides* hari ke-14 89
15 Hasil testt uji intensitas PSD *nanobubble* Pompa 1 90
16 Hasil testt uji intensitas *nanobubble* Pompa 1 91
17 Hasil uji test *zeta potential report* pompa 1 92
18 Hasil test uji tegangan dan arus permukaan Pompa 1 93
19 Hasil test uji intensitas PSD *nanobubble* Pompa 2 94
20 Hasil test uji intensitas *nanobubble* Pompa 2 95
21 Manual ISO 22412 *particle size analysis*-DLS 96
22 Manual ISO 20480-1:2017 *Fine bubble technology* 97
23 Dokumentasi foto saat melakukan percobaan 1 98
24 Dokumentasi saat melakukan percobaan 2 99

IPB University Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University