

OPTIMASI LAJU TRANSFER OKSIGEN TERHADAP KINERJA *MOVING BED BIOFILM REACTOR* KOMBINASI MEMBRAN NANOFILTRASI PADA SISTEM RESIRKULASI AKUAKULTUR

ARYA MUHAMMAD KOERNIA



**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL DAN LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@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.

PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Optimasi Laju Transfer Oksigen Terhadap Kinerja *Moving Bed Biofilm Reactor* Kombinasi Membran Nanofiltrasi pada Sistem Resirkulasi Akuakultur” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun 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, Juli 2026

Arya Muhammad Koernia
F4501241031

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

- 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.

RINGKASAN

ARYA MUHAMMAD KOERNIA. Optimasi Laju Transfer Oksigen Terhadap Kinerja *Moving Bed Biofilm Reactor* Kombinasi Membran Nanofiltrasi pada Sistem Resirkulasi Akuakultur. Dibimbing oleh ALLEN KURNIAWAN dan SATYANTO KRIDO SAPTOMO.

Akumulasi amonia (0,72 mg/L) dan nitrit (0,53 mg/L) dari metabolisme ikan koi memicu penurunan pH media hingga 5,0, melampaui ambang batas baku mutu akuakultur. Tesis ini mengevaluasi kinerja sistem resirkulasi akuakultur (RAS) terintegrasi yang menggabungkan reaktor *moving bed biofilm reactor* (MBBR) bermedia Kaldnes K5 (pengisian 60%) dan filtrasi fisik membran nanofiltrasi (NF90-4040), yang didukung oleh pengembangan *Integrated Hybrid Model* berbasis *unsteady-state*. Reaktor berskala laboratorium ini dioperasikan pada debit sirkulasi konstan 40 L/min dengan tiga variasi debit aerasi (100, 150, dan 190 L/min). Hasil menunjukkan sistem mencapai efisiensi penyisihan amonia 23,32–97,01%. Kondisi operasional terbaik tercapai pada debit aerasi 150 L/min dengan konsentrasi amonia permeat rata-rata terendah (0,03 mg/L), efisiensi penyisihan nitrit tertinggi (87,19%), serta kerapatan biomassa melekat (TAS) maksimal sebesar 8,4 g/m². Sebaliknya, peningkatan aerasi hingga 190 L/min memicu *fluid shear stress* yang merontokkan biofilm (TAS turun menjadi 7,8 g/m²) dan menurunkan penyisihan nitrit hingga 43,67% akibat hilangnya keseimbangan populasi AOB dan NOB. Fenomena *membrane fouling* paling masif terjadi pada debit 150 L/min dengan laju *fouling* harian sebesar 0,11 bar/hari, pemicunya adalah pelepasan *Soluble Microbial Products* (SMP) akibat mekanisme kelaparan (*starvation*) saat beban substrat amonia sangat rendah. Validasi *Integrated Hybrid Model* menunjukkan presisi tinggi pada parameter amonia permeat ($R^2 = 0,895$; $r = 0,946$) dan fluks membran ($R^2 = 0,930$; $r = 0,964$), serta terbukti valid secara statistik ($p > 0,05$). Secara keseluruhan, konfigurasi MBBR–NF efektif menyisihkan nitrogen terlarut, namun pengendalian alkalinitas dan laju aerasi wajib dijaga secara ketat untuk mencegah *pH crash* di bawah 5,5 serta meminimalkan *irreversible fouling* akibat akumulasi SMP.

Kata kunci: Akuakultur, Amonia, *Fouling*, Nanofiltrasi, Pemodelan Hibrida

SUMMARY

ARYA MUHAMMAD KOERNIA. Optimization of the Oxygen Transfer Rate for Enhancing the Performance of a Moving Bed Biofilm Reactor Integrated with a Nanofiltration Membrane in Recirculating Aquaculture Systems. Supervised by ALLEN KURNIAWAN and SATYANTO KRIDO SAPTOMO.

Accumulation of ammonia (0.72 mg/L) and nitrite (0.53 mg/L) from koi fish metabolism triggers a drop in water pH to 5.0, exceeding aquaculture water quality standards. This thesis evaluates the performance of an integrated recirculating aquaculture system (RAS) combining a moving bed biofilm reactor (MBBR) with Kaldnes K5 media (60% filling ratio) and a nanofiltration membrane (NF90-4040), supported by the development of an unsteady-state Integrated Hybrid Model. The bench-scale reactor was operated at a constant circulation rate of 40 L/min under three aeration rates (100, 150, and 190 L/min). Results demonstrated ammonia removal efficiencies ranging from 23.32% to 97.01%. Optimal performance was achieved at an aeration rate of 150 L/min, yielding the lowest average permeate ammonia concentration (0.03 mg/L), highest nitrite removal efficiency (87.19%), and maximum attached biomass density ($TAS = 8.4 \text{ g/m}^2$). Conversely, increasing aeration to 190 L/min induced fluid shear stress that detached the biofilm (TAS dropped to 7.8 g/m^2) and reduced nitrite removal to 43.67% due to the disruption of AOB and NOB population balance. Severe membrane fouling occurred at 150 L/min with a daily fouling rate of 0.11 bar/day, driven by the release of Soluble Microbial Products (SMP) under substrate starvation at low ammonia loads. Validation of the Integrated Hybrid Model demonstrated high predictive accuracy for permeate ammonia ($R^2 = 0.895$; $r = 0.946$) and membrane flux ($R^2 = 0.930$; $r = 0.964$), and was statistically proven valid ($p > 0.05$). Overall, the MBBR–NF configuration effectively removes dissolved nitrogen; however, strict control of alkalinity and aeration rate is required to prevent pH crash below 5.5 and minimize irreversible fouling from SMP accumulation.

Keywords: Aquaculture, Ammonia, *Fouling*, Nanofiltration, Hybrid Modeling

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 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, tahun 2026
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.

OPTIMASI LAJU TRANSFER OKSIGEN TERHADAP KINERJA *MOVING BED BIOFILM REACTOR* KOMBINASI MEMBRAN NANOFILTRASI PADA SISTEM RESIRKULASI AKUAKULTUR

ARYA MUHAMMAD KOERNIA

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik pada
Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL DAN LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@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.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Tim Penguji pada Ujian Tesis:
Dr. Ir. Yudi Chadirin, S.T.P., M.Agr.



- 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

- 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.

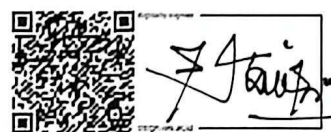
Judul Tesis : Optimasi Laju Transfer Oksigen Terhadap Kinerja *Moving Bed Biofilm Reactor* Kombinasi Membran Nanofiltrasi pada Sistem Resirkulasi Akuakultur
Nama : Arya Muhammad Koernia
NIM : F4501241031

Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Dosen Pembimbing 1:
Dr. Eng. Ir. Allen Kurniawan, S.T., M.T.
NIP. 19820729 201012 1 005

Dosen Pembimbing 2:
Prof. Dr. Ir. Satyanto Krido Saptomo, S.T.P., M.Si.
NIP. 19730411 200501 1 002



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Ir. Satyanto Krido Saptomo, S.T.P., M.Si.
NIP. 19730411 200501 1 002

Dekan Fakultas Teknik dan Teknologi:
Prof. Dr. Ir. Slamet Budijanto, M. Agr.
NIP. 19610502 198603 1 002



Tanggal Ujian:
14 Juli 2026

Tanggal Lulus:

03 AUG 2026

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga tesis yang berjudul "Optimasi Laju Transfer Oksigen Terhadap Kinerja *Moving Bed Biofilm Reactor* Kombinasi Membran Nanofiltrasi pada Sistem Resirkulasi Akuakultur" ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian dilaksanakan sejak bulan Oktober 2024 sampai bulan Februari 2025.

Penyusunan tesis ini tidak terlepas dari dukungan, bantuan, bimbingan, doa, dan nasehat berbagai pihak. Terima kasih penulis ucapkan kepada semua pihak yang telah berperan serta dalam penyusunan tesis ini, khususnya kepada:

1. Bapak Raden Achmad Koernia Soegandhi dan Ibu Winy Widianty selaku orang tua yang senantiasa mendampingi, mendoakan, dan memberikan dukungan moril dan materiil yang tiada henti hingga saat ini.
2. Dr. Eng. Ir. Allen Kurniawan, S.T., M.T. dan Prof. Dr. Ir. Satyanto Krido Saptomo, S.TP., M.Si. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan ilmu dalam memahami proses penelitian dan penyusunan tesis ini.
3. Alifah Shabrina Koernia dan Trya Rahadi Koernia selaku saudara kandung penulis yang telah memberikan memberikan motivasi, keceriaan, dan semangat dalam menyelesaikan studi ini.
4. Khusnita Azizah, Alimah Hasyiyati Sahda, Rizky Mursyidan Baldan, dan Daffa Aqilla Prayogi selaku teman satu bimbingan yang selalu dapat diandalkan untuk bekerja sama, bertukar pikiran, dan berjuang bersama.
5. Muhammad Iqbal Hadi Rinaldo dan Annisa Nur Fadhillah selaku sahabat penulis yang senantiasa menemani dan memberikan dukungan semangat.
6. Krisna Bayu selaku sahabat terdekat yang selalu menjadi tempat bertukar cerita, memberikan dukungan solid, dan saling menguatkan dalam berbagai situasi.
7. Lulu Latifah yang senantiasa hadir sebagai sistem pendukung terbaik, memberikan doa, dan motivasi terbesar bagi penulis dalam menyelesaikan tesis ini, serta semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah membantu dan memberikan dukungan.

Penulis menyadari bahwa tesis ini jauh dari kata sempurna. Untuk itu, diharapkan kritik dan saran membangun untuk dijadikan masukan yang berguna. Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, 30 Juli 2026

Arya Muhammad Koernia

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR NOTASI	xiv
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	4
1.5 Ruang Lingkup	4
II METODE	5
2.1 Waktu dan Tempat Penelitian	5
2.2 Alat dan Bahan	5
2.3 Prosedur Pengujian	6
2.4 Prosedur Penggunaan VBA	12
2.5 Uji Statistik dan Validitas	13
2.6 Uji Sensitivitas	14
2.7 Simulasi Skenario	15
III HASIL DAN PEMBAHASAN.....	18
3.1 Karakteristik Limbah Cair Akuakultur	18
3.2 <i>Seeding</i> dan Aklimatisasi Bakteri Nitrifikasi pada Unit MBBR	18
3.3 Kinerja dan Pengaruh RAS Terhadap Parameter Kualitas Air	19
3.4 Pengembangan Model Kinerja Unit RAS	27
3.5 Uji Statistik dan Validitas Model	28
3.6 Uji Sensitivitas	29
3.7 Simulasi Skenario dan Proyeksi Kinerja Operasional	30
3.8 Analisis Batasan Operasional	35
IV SIMPULAN DAN SARAN	37
4.1 Simpulan	37
4.2 Saran	37
DAFTAR PUSTAKA.....	38
LAMPIRAN	43
RIWAYAT HIDUP	55

DAFTAR TABEL

1	Tabel 2.1 Spesifikasi Membran NF90-4040	6
2	Tabel 2.2 Variasi pengujian	9
3	Tabel 3.1 Karakteristik Awal Air Limbah Akuakultur	18
4	Tabel 3.2 Konsentrasi TAS pada Efluen Unit MBBR	22
5	Tabel 3.3 Parameter Terpilih untuk Pemodelan Kinerja RAS	27

DAFTAR GAMBAR

1	Gambar 2.1 Diagram alir pengujian	6
2	Gambar 2.2 Desain aktual RAS	7
3	Gambar 2.3 Konfigurasi aliran air pada RAS	7
4	Gambar 3.1 <i>Seeding</i> dan Aklimatisasi Bakteri Nitrifikasi	19
5	Gambar 3.2 Konsentrasi amonia pada konfigurasi RAS	20
6	Gambar 3.3 Konsentrasi nitrit pada konfigurasi RAS	21
7	Gambar 3.4 Konsentrasi DO dan suhu pada permeat unit RAS	23
8	Gambar 3.5 Konsentrasi alkalinitas dan pH pada influen dan permeat unit RAS	25
9	Gambar 3.6 Nilai fluks permeat NF per hari	26
10	Gambar 3.7 Perbandingan hasil pengukuran dengan hasil model	29
11	Gambar 3.8 Tingkat signifikansi parameter berdasarkan simulasi Monte Carlo	30
12	Gambar 3.9 Profil β dan C_p pada berbagai variasi debit aerasi dan konsentrasi beban amonia	31
13	Gambar 3.10 Karakteristik Kinerja Reaktor pada Variasi Tingkat Keasaman dan Fluktuasi Temperatur Sistem	32
14	Gambar 3.11 Profil Pengaruh Suhu Operasional dan Fluktuasi TAS terhadap Kinerja Penyisihan Amonia	33
15	Gambar 3.12 Hubungan Debit Sirkulasi dan TAS terhadap Efisiensi Penyisihan Konsentrasi Amonia	35

DAFTAR LAMPIRAN

1	Lampiran 1 Data pengukuran parameter air	44
2	Lampiran 2 Kode pemrograman VBA untuk pemodelan	50

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.

DAFTAR NOTASI

μ	=	Laju pertumbuhan spesifik mikroorganisme (hari^{-1})
$\mu_{\max}$	=	Laju pertumbuhan maksimum mikroorganisme (hari^{-1})
S	=	Konsentrasi amonia dalam unit MBBR (mg/L)
K_s	=	Konsentrasi setengah jenuh (mg/L)
Q	=	Debit aliran (L/min)
DO	=	Konsentrasi oksigen terlarut (mg/L)
K_{DO}	=	Konstanta setengah jenuh oksigen (mg/L)
$k_L a$	=	Koefisien transfer massa volumetrik oksigen (menit^{-1})
k_d	=	Konstanta laju konsumsi gas spesifik (menit^{-1})
β	=	Sensitivitas stres biomassa (menit)
α	=	Faktor konveksi oksigen (mg/L.menit)
A_w	=	Permeabilitas air murni ($\text{L/m}^2.\text{jam.bar}$)
k_{foul_1}	=	Laju fouling V1 (bar/hari)
k_{foul_2}	=	Laju fouling V2 (bar/hari)
k_{foul_3}	=	Laju fouling V3 (bar/hari)
P_{off_1}	=	Offset tekanan V1 (bar)
P_{off_2}	=	Offset tekanan V2 (bar)
B_s	=	Permeabilitas solut ($\text{L/m}^2.\text{jam}$)
C_{feed}	=	Konsentrasi amonia umpan membran (mg/L)
C_{in}	=	Konsentrasi amonia influen MBBR (mg/L)
C_p	=	Konsentrasi amonia permeat (mg/L)
f_{temp}	=	Faktor suhu
f_{pH}	=	Faktor pH
P_{net}	=	Tekanan pendorong bersih (bar)
J_v	=	Fluks permeat ($\text{L/m}^2.\text{jam}$)
J_s	=	Fluks solut ($\text{mg/m}^2.\text{jam}$)