

**PENGARUH PENAMBAHAN *ECO-ENZYME* DAN PROSES
INTERMITTENT MOVING BED BIOFILM REACTOR (MBBR)
PADA PENGOLAHAN LIMBAH DOMESTIK**

SKRIPSI



Oleh :

ADINDA PERMATA SALSABILA

NPM: 21034010001

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"**

**JAWA TIMUR
FAKULTAS TEKNIK DAN SAINS
PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
SURABAYA
TAHUN 2026**

**PENGARUH PENAMBAHAN *ECO-ENZYME* DAN PROSES
INTERMITTENT MOVING BED BIOFILM REACTOR (MBBR)
PADA PENGOLAHAN LIMBAH DOMESTIK**

SKRIPSI

**Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Dalam Memperoleh Gelar Sarjana Teknik (ST.)
Program Studi Teknik Lingkungan.**

Diajukan Oleh :

ADINDA PERMATA SALSABILA

NPM: 21034010001

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"**

**JAWA TIMUR
FAKULTAS TEKNIK DAN SAINS
PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
SURABAYA
TAHUN 2026**

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH PENAMBAHAN *ECO-ENZYME* DAN PROSES
INTERMITTENT MOVING BED BIOFILM REACTOR (MBBR)
PADA PENGOLAHAN LIMBAH DOMESTIK**

Disusun Oleh :


Adinda Permata Salsabila
NPM 21034010001

Telah disetujui untuk mengikuti Ujian Penelitian

Menyetujui,

Pembimbing


Praditva Sigit Ardisty Sitogasa, S.T., M.T.
NIP. 19901001 202406 2 001

Mengetahui,
**Dekan Fakultas Teknik Dan Sains
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur**


Prof. Dr. Dra. Jarivah., MP
NIP. 19650403 199103 2 001

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH PENAMBAHAN *ECO-ENZYME* DAN PROSES
INTERMITTENT MOVING BED BIOFILM REACTOR (MBBR)
PADA PENGOLAHAN LIMBAH DOMESTIK**

Disusun Oleh :


Adinda Permata Salsabila
NPM 21034010001

Telah diuji kebenaran oleh Tim Penguji dan diterbitkan pada Jurnal Media
Ilmiah Teknik Lingkungan (Terakreditasi Sinta 4)

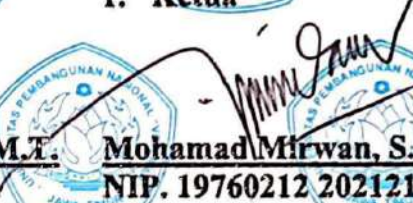
Menyetujui,

TIM PENGUJI

1. Ketua

Pembimbing


Praditva Sigit Ardisty Sitogasa, S.T., M.T.
NIP. 19901001 202406 2 001


Mohamad Mirwan, S.T., M.T.
NIP. 19760212 202121 1 004

2. Anggota


Raden Kekoh Haryo Putro, S.T., M.T.
NIP. 19900905 201903 1 026

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik dan Sains
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur


Prof. Dr. Dra. Jariyah, M.P.
NIP. 19650403 199103 2 001

LEMBAR REVISI

**PENGARUH PENAMBAHAN *ECO-ENZYME* DAN PROSES
INTERMITTENT MOVING BED BIOFILM REACTOR (MBBR)
PADA PENGOLAHAN LIMBAH DOMESTIK**

Disusun Oleh :


Adinda Permata Salsabila
NPM 21034010001

Telah direvisi dan disahkan pada tanggal 18 Februari 2026

TIM PENILAI

KETUA

ANGGOTA


Mohamad Mirwan, ST., MT.
NIP. 19760212 202121 1 004


Raden Kokoh Haryo Putro, ST., MT.
NIP. 19900905 201903 1 026

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Adinda Permata Salsabila

NPM : 21034010001

Program : Sarjana (S1)

Program Studi: Teknik Lingkungan

Fakultas : Teknik Dan Sains

Menyatakan bahwa dalam dokumen ilmiah Tugas Akhir/Skripsi ini tidak terdapat bagian dari karya ilmiah lain yang telah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu lembaga Pendidikan Tinggi, dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang/lembaga lain, kecuali yang secara tertulis disitasi dalam dokumen ini dan disebutkan secara lengkap dalam daftar pustaka.

Dan saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur-unsur plagiasi. Apabila dikemudian hari ditemulan indikasi plagiat pada Skripsi ini, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya tanpa ada paksaan dari siapapun juga dan untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Surabaya, 18 Februari 2026

Yang Membuat Pernyataan



Adinda Permata Salsabila
NPM. 21034010001

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul "Pengaruh Penambahan *Eco-enzyme* dan Proses *Intermittent Moving Bed Biofilm Reactor* pada Pengolahan Limbah Domestik". Skripsi ini merupakan salah satu syarat yang harus ditempuh untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Fakultas Teknik dan Sains Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Dra. Jariyah, M.P., selaku Dekan Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur.
2. Firra Rosariawari, S.T., M.T, selaku Koordinator Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur.
3. Praditya Sigit Ardisty Sitogasa, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan arahan, saran, dan motivasi selama penyusunan skripsi.
4. Seluruh dosen dan staff Pengajar Program Studi Teknik Lingkungan yang telah membagikan ilmu di dalam kelas maupun saat diskusi.
5. Kedua orang tua penulis yang terkasih. Terima kasih sebesar-besarnya atas do'a yang tak pernah terputus, kasih sayang yang tulus, serta pengorbanan yang tak terhitung nilainya, sehingga penulis memiliki kekuatan dan semangat untuk menyelesaikan studi ini. Segala kebaikan, kesabaran, dan cinta yang senantiasa diberikan menjadi fondasi utama dalam setiap langkah perjalanan penulis hingga mencapai titik ini.
6. Seluruh teman-teman program studi Teknik Lingkungan angkatan 2021 yang telah memberikan dukungan dan selalu membantu sama lain saat berkuliah dan saat menyusun laporan skripsi ini.
7. Segenap pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu namun telah membantu secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna sehingga diperlukan kritik dan saran dari berbagai pihak. Semoga skripsi

ini dapat memberikan manfaat bagi penulis, pembaca, universitas, dan khususnya program studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik dan Sains Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur.

Surabaya, 13 Januari 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
ABSTRAK.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Tinjauan Umum	6
2.1.1 Limbah Cair Domestik.....	6
2.1.2 Karakteristik Limbah Cair Domestik.....	8
2.1.3 Parameter Pencemar yang Akan Diturunkan dalam Penelitian	9
2.1.4 Baku Mutu Air Limbah.....	10
2.2 Landasan Teori.....	11
2.2.1 <i>Moving Bed Biofilm Reactor</i> (MBBR)	11
2.2.2 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja MBBR	14
2.2.3 Sumber Karbon Eksternal	15
2.2.4 <i>Eco-enzyme</i>	16
2.2.5 Degradasi Zat Organik Pada Kondisi Aerobik dan Anoksik.....	17

2.2.6	Mekanisme Denitrifikasi dengan Penambahan Sumber Karbon Eksternal dalam Penurunan COD, BOD, dan Amonia	19
2.3	Hasil Penelitian Terdahulu	21
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		25
3.1	Kerangka Penelitian	25
3.2	Alat dan Bahan.....	28
3.2.1	Alat Penelitian.....	28
3.2.2	Bahan Penelitian	28
3.3	Cara Kerja	28
3.3.1	Tahap Persiapan	28
3.3.2	<i>Seeding</i> & Aklimatisasi.....	29
3.3.3	Pelaksanaan Penelitian Utama	30
Tabel 3.2 Variasi durasi proses aerobik–anoksik		30
Tabel 3.3 Variasi dosis penambahan <i>eco-enzyme</i>		31
3.4	Variabel yang ditetapkan.....	32
3.5	Rancangan Reaktor	38
3.6	Analisis Hasil	39
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		43
4.1	Hasil Penelitian	43
4.1.1	Analisis Awal Karakteristik Limbah Domestik.....	43
4.1.2	<i>Seeding</i> dan Aklimatisasi	44
4.2	Hasil Analisis Data Uji <i>Intermittent Moving Bed Biofilm Reactor</i> pada Pengolahan Limbah Domestik.....	45
4.2.1	Hasil Uji Parameter COD (<i>Chemical Oxygen Demand</i>) pada <i>Intermittent Moving Bed Biofilm Reactor</i> Terhadap Berbagai Perlakuan.....	46

4.2.2	Hasil Uji Parameter BOD (<i>Biological Oxygen Demand</i>) pada <i>Intermittent Moving Bed Biofilm Reactor</i> Terhadap Berbagai Perlakuan.....	49
4.2.3	Hasil Uji Parameter Amonia pada <i>Intermittent Moving Bed Biofilm Reactor</i> Terhadap Berbagai Perlakuan.....	51
4.2.4	Hasil Uji Parameter Nitrat pada <i>Intermittent Moving Bed Biofilm Reactor</i> Terhadap Berbagai Perlakuan.....	53
4.2.5	Hasil Uji Parameter DO (<i>Dissolved Oxygen</i>) pada <i>Intermittent Moving Bed Biofilm Reactor</i> Terhadap Berbagai Perlakuan	55
4.2.6	Hasil Uji Parameter pH pada <i>Intermittent Moving Bed Biofilm Reactor</i> Terhadap Berbagai Perlakuan.....	57
4.2.7	Hasil Uji Parameter Suhu pada <i>Intermittent Moving Bed Biofilm Reactor</i> Terhadap Berbagai Perlakuan.....	59
4.3	Pembahasan.....	61
4.3.1	Pengaruh Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i> Terhadap Parameter COD (<i>Chemical Oxygen Demand</i>)	61
4.3.2	Pengaruh Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i> Terhadap Parameter BOD (<i>Biological Oxygen Demand</i>)	71
4.3.3	Pengaruh Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i> Terhadap Parameter Amonia	82
4.3.4	Pengaruh Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i> Terhadap Parameter Nitrat	91
4.3.5	Pengaruh Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i> Terhadap Parameter DO (<i>Dissolved Oxygen</i>)	100
4.3.6	Pengaruh Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i> Terhadap Parameter pH.....	102

4.3.7	Pengaruh Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i> Terhadap Parameter Suhu.....	103
4.4	Analisis Statistik	104
4.4.1	Analisis Statistik ANOVA <i>Two Way</i> Parameter COD (<i>Chemical Oxygen Demand</i>).....	104
4.4.2	Analisis Statistik ANOVA <i>Two Way</i> Parameter BOD (<i>Biological Oxygen Demand</i>).....	105
4.4.3	Analisis Statistik ANOVA <i>Two Way</i> Parameter Amonia.....	106
4.4.4	Analisis Statistik ANOVA <i>Two Way</i> Parameter Nitrat.....	107
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		109
5.1	Kesimpulan	109
5.2	Saran	110
DAFTAR PUSTAKA		111
LAMPIRAN A DATA HASIL PENELITIAN		119
LAMPIRAN B PERHITUNGAN DAN PROSEDUR KERJA PENELITIAN...		126
LAMPIRAN C DOKUMENTASI		136
LAMPIRAN D PENDUKUNG		139

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Baku Mutu Air Limbah.....	11
Tabel 2.2 Jenis Media dan Spesifikasinya	13
Tabel 3.1 Karakteristik eco-enzyme yang digunakan	29
Tabel 3.4 Matriks Variabel Penelitian Utama Pada Reaktor MBBR	36
Tabel 4.1 Hasil Uji Awal Limbah Domestik Rusunawa Gununganyar Sawah .	43
Tabel 4.2 Hasil Uji Parameter COD Terhadap Variasi Perlakuan Berdasarkan Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i>	48
Tabel 4.3 Hasil Uji Parameter BOD Terhadap Variasi Perlakuan Berdasarkan Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i>	50
Tabel 4.4 Hasil Uji Parameter Amonia Terhadap Variasi Perlakuan Berdasarkan Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i>	52
Tabel 4.5 Hasil Uji Parameter Nitrat Terhadap Variasi Perlakuan Berdasarkan Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i>	54
Tabel 4.6 Hasil Uji Parameter DO Terhadap Variasi Perlakuan Berdasarkan Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i>	56
Tabel 4.7 Hasil Uji Parameter pH Terhadap Variasi Perlakuan Berdasarkan Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i>	58
Tabel 4.8 Hasil Uji Parameter Suhu Terhadap Variasi Perlakuan Berdasarkan Rasio Durasi Pengolahan <i>Intermittent</i> dan Dosis Penambahan <i>Eco-enzyme</i>	60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Ilustrasi Operasional MBBR Rasio Durasi Pengolahan 2:1	33
Gambar 3.2 Ilustrasi Operasional MBBR Rasio Durasi Pengolahan 4:1	34
Gambar 3.3 Ilustrasi Operasional MBBR Rasio Durasi Pengolahan 6:1	35
Gambar 3.4 Reaktor Uji MBBR	38
Gambar 4.1 (a) Media Kaldnes K5 pada hari ke-0, (b) Media Kaldnes K5 pada hari ke-30.....	45
Gambar 4.2 Removal COD Fase Aerobik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Pertama	62
Gambar 4.3 Removal COD Fase Anoksik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Pertama	63
Gambar 4.4 Efisiensi Removal COD pada Siklus Pertama.....	64
Gambar 4.6 Removal COD Fase Anoksik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Kedua	66
Gambar 4.7 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi COD pada Siklus Kedua.....	67
Gambar 4.9 Removal COD Fase Anoksik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Ketiga.....	69
Gambar 4.10 Efisiensi Removal COD pada Siklus Ketiga	70
Gambar 4.11 Removal BOD Fase Aerobik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Pertama	72
Gambar 4.12 Removal BOD Fase Anoksik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Pertama	73
Gambar 4.13 Efisiensi Removal BOD pada Siklus Pertama.....	74
Gambar 4.14 Removal BOD Fase Aerobik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Kedua	75
Gambar 4.15 Removal BOD Fase Anoksik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Kedua	76

Gambar 4.16 Efisiensi Removal BOD pada Siklus Kedua	77
Gambar 4.17 Removal BOD Fase Aerobik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Ketiga.....	78
Gambar 4.18 Removal BOD Fase Anoksik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Ketiga.....	79
Gambar 4.19 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi BOD pada Siklus Ketiga ...	80
Gambar 4.20 Removal Amonia Fase Aerobik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Pertama.....	82
Gambar 4.19 Removal Amonia Fase Anoksik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Pertama.....	83
Gambar 4.20 Efisiensi Removal Amonia pada Siklus Pertama	84
Gambar 4.23 Removal amonia Fase Aerobik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Kedua	85
Gambar 4.22 Removal Amonia Fase Anoksik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Kedua.....	86
Gambar 4.23 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi amonia pada Siklus Kedua	87
Gambar 4.26 Removal Amonia Fase Aerobik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Ketiga	88
Gambar 4.25 Removal Amonia Fase Anoksik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Ketiga	89
Gambar 4.26 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Amonia pada Siklus Ketiga	90
Gambar 4.26 Removal Nitrat Fase Aerobik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Pertama	92
Gambar 4.27 Removal Nitrat Fase Anoksik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Pertama	93
Gambar 4.28 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat pada Siklus Pertama	93

Gambar 4.29 Removal amonia Fase Aerobik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Kedua	94
Gambar 4.30 Removal Nitrat Fase Anoksik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Kedua	95
Gambar 4.31 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat pada Siklus Kedua...	96
Gambar 4.32 Removal Amonia Fase Aerobik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Ketiga	97
Gambar 4.33 Removal Nitrat Fase Anoksik tiap Rasio Durasi Pengolahan pada Siklus Ketiga.....	98
Gambar 4.34 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat pada Siklus Ketiga ..	98
Gambar 4.30 Perubahan Konsentrasi DO tiap Siklus Pada Rasio Durasi Pengolahan 2:1	100
Gambar 4.31 Perubahan Konsentrasi DO tiap Siklus Pada Rasio Durasi Pengolahan 4:1	101
Gambar 4.32 Perubahan Konsentrasi DO tiap Siklus Pada Rasio Durasi Pengolahan 6:1	101

ABSTRAK

Limbah cair domestik diketahui mengandung beban pencemar organik dan nutrisi dalam konsentrasi yang cukup tinggi, sehingga diperlukan teknologi pengolahan yang tepat sebelum air limbah tersebut dilepaskan ke lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) yang dioperasikan secara intermitten dengan penambahan *eco-enzyme* sebagai sumber karbon eksternal dalam mereduksi konsentrasi pencemar utama pada limbah domestik. Percobaan dilaksanakan pada skala laboratorium dengan menerapkan variasi rasio durasi intermitten dan variasi dosis penambahan *eco-enzyme*. Parameter kualitas air yang diukur dan dianalisis dalam penelitian ini meliputi COD, BOD, dan amonia. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa sistem MBBR dengan penambahan *eco-enzyme* mampu menyisihkan pencemar secara signifikan. Penyisihan COD tertinggi mencapai 87% pada dosis *eco-enzyme* sebesar 1,5%, sedangkan penurunan BOD tertinggi sebesar 89% dicapai pada dosis 2%. Parameter amonia juga mengalami penurunan yang cukup besar, yakni mencapai 93% pada dosis penambahan *eco-enzyme* sebesar 2%. Seluruh nilai efluen yang dihasilkan dari proses pengolahan ini telah memenuhi ketentuan baku mutu air limbah domestik sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri LHK Nomor 68 Tahun 2016. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa MBBR intermitten dengan penambahan *eco-enzyme* sebagai sumber karbon tambahan merupakan metode pengolahan limbah domestik yang efektif sekaligus berkelanjutan.

Kata kunci: *Eco-enzyme*, limbah domestik, MBBR, proses aerobik-anoksik, sumber karbon eksternal

ABSTRACT

Domestic wastewater is known to contain relatively high concentrations of organic pollutants and nutrients; therefore, appropriate treatment technology is required before it is discharged into the environment. This study aims to evaluate the performance of a Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) operated intermittently with the addition of eco-enzyme as an external carbon source in reducing major pollutants in domestic wastewater. The experiment was conducted at a laboratory scale by applying variations in intermittent duration ratios and eco-enzyme dosages. The water quality parameters analyzed in this study included COD, BOD, and ammonia. The results indicate that the MBBR system with eco-enzyme addition was able to significantly remove pollutants. The highest COD removal efficiency reached 87% at an eco-enzyme dosage of 1.5%, while the highest BOD reduction of 89% was achieved at a 2% dosage. Ammonia concentration also decreased substantially, reaching up to 93% removal at a 2% eco-enzyme dosage. All effluent values produced by this treatment process complied with the domestic wastewater quality standards stipulated in Peraturan Menteri LHK Nomor 68 Tahun 2016. Overall, this study demonstrates that an intermittent MBBR system supplemented with eco-enzyme as an additional carbon source is an effective and sustainable method for domestic wastewater treatment.

Keywords: *Eco-enzyme, domestic wastewater, MBBR, aerobic–anoxic, external carbon source.*