UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Biodiesel PT X Cilegon serta Analisis Tekno-Ekonomi
Irwan Mulyadi, Prof. Ir. Rochim Bakti Cahyono, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM.; Ir. Yuni Kusumastuti, S.T., M.Eng., D.Eng., I
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN ..... **i**
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI ..... **iii**
DAFTAR ISI ..... **iv**
DAFTAR GAMBAR ..... **vii**
DAFTAR TABEL ..... **ix**
BAB I PENDAHULUAN **1**
I. 1. Latar Belakang 1
I. 2. Batasan Masalah 4
I. 3. Rumusan Masalah 5
I. 4. Kebaruan Penelitian 5
I. 5. Tujuan Penelitian 8
I. 6. Manfaat Penelitian 8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **10**
II. 1. Tinjauan Pustaka 10
II.1.1. Industri Biodiesel 10
II.1.2. Parameter Pencemaran Air Limbah Industri Biodiesel 12
II.1.2.1. *Chemical Oxygen Demand* (COD) 13
II.1.2.2. *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) 13
II.1.2.3. *Total Suspended Solids* (TSS) 14
II.1.2.4. *Potential of Hydrogen* (pH) 14
II.1.2.5. Minyak dan Lemak 15
II.1.3. Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Biodiesel 15
II.1.4. Proses Pengolahan Air Limbah 16
II.1.4.1. *Pretreatment* 16
II.1.4.1.1. Screening 17
II.1.4.1.2. Equalization Tank 17
II.1.4.1.3. Oil Trap / Grease Trap 18
II.1.4.2. *Primary treatment* 18
II.1.4.2.1. Sedimentasi 18
II.1.4.2.2. Koagulasi-Flokulasi (CF) 18
II.1.4.2.3. Clarifier 23

Optimasi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Biodiesel PT X Cilegon serta Analisis Tekno-Ekonomi
Irwan Mulyadi, Prof. Ir. Rochim Bakti Cahyono, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM.; Ir. Yuni Kusumastuti, S.T., M.Eng., D.Eng., I
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

II.1.4.2.4. *Dissolved Air Flotation* (DAF) 23
II.1.4.3. *Secondary treatment* 27
II.1.4.3.1. Proses Aerobik 28
II.1.4.3.2. Proses Anaerobik 28
II.1.4.3.3. *Membrane Bioreactor* (MBR) 29
II.1.4.4. *Tertiary treatment* 31
II.1.4.4.1. Adsorpsi 31
II.1.4.4.2. Fitoremediasi 32
II.1.4.5. *Sludge handling* 33
II.1.5. Analisis Tekno-Ekonomi Dalam Pengolahan Limbah 33
II. 2. Landasan Teori 35
II. 3. Hipotesis 40
BAB III METODE PENELITIAN 42
III.1. Diagram Alir Penelitian 42
III.2. Bahan dan Alat Penelitian 42
III.2.1. Bahan Penelitian 42
III.2.2. Alat Penelitian 43
III.3. Variabel Penelitian 43
III.3.1. Variabel Bebas 43
III.3.2. Variabel Tetap 43
III.3.3. Parameter 43
III.4. Prosedur Penelitian 44
III.4.1. Persiapan Awal dan Karakterisasi Sampel 44
III.4.2. Persiapan Bahan Kimia 46
III.4.3. Pelaksanaan Proses CF pada IPAL 46
III.4.4. Pelaksanaan Proses DAF pada IPAL 46
III.4.5. Pelaksanaan Proses MBR pada IPAL 46
III.4.6. Analisis Sampel Outlet IPAL 47
III.4.7. Analisis Tekno-Ekonomi (TEA) 47
III.4.7.1. Penetapan Basis Perhitungan (*Functional Unit*) 47
III.4.7.2. Metodologi Estimasi *Capital Expenditure* (CAPEX) 48
III.4.7.3. Metodologi Estimasi *Operational Expenditure* (OPEX) 48
III.4.7.4. Analisis Indikator Kelayakan Ekonomi 49
III.4.7.5. Analisis Sensitivitas 50

Optimasi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Biodiesel PT X Cilegon serta Analisis Tekno-Ekonomi
Irwan Mulyadi, Prof. Ir. Rochim Bakti Cahyono, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM.; Ir. Yuni Kusumastuti, S.T., M.Eng., D.Eng., I
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 51
IV.1. Analisis Awal Kualitas Limbah Cair Biodiesel 51
IV.2. Analisis Kualitas Limbah dengan Variasi Koagulan 52
IV.2.1. Analisis Kualitas Limbah dengan Variasi Dosis Koagulan Tawas 52
IV.2.2. Analisis Kualitas Limbah dengan Variasi Dosis Koagulan PAC 59
IV.2.3. Analisis Kualitas Limbah dengan Variasi Skema Proses Pengolahan untuk Dosis Koagulan Optimum 66
IV.3. Analisis Tekno-Ekonomi Pada IPAL PT X Cilegon 79
IV.3.1. Basis Perhitungan dan Asumsi Ekonomi 79
IV.3.2. Estimasi Biaya Investasi (*Capital Expenditure* / CAPEX) 81
IV.3.3. Estimasi Biaya Operasional (*Operational Expenditure* / OPEX) 82
IV.3.4. Analisis Kelayakan Ekonomi (*Levelized Cost of Treatment*/LCOT) ... 84
IV.3.5. Analisis *Internal Rate of Return* (IRR) Inkremental 87
IV.3.6. Pembahasan Sinergi Teknis dan Ekonomis 91
IV.3.7. Analisis Sensitivitas LCOT pada Skema Pengolahan Optimum 92
BAB V KESIMPULAN 97
V.1. Kesimpulan 97
V.2. Saran 98
DAFTAR PUSTAKA 101

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Biodiesel PT X Cilegon serta Analisis Tekno-Ekonomi
Irwan Mulyadi, Prof. Ir. Rochim Bakti Cahyono, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM.; Ir. Yuni Kusumastuti, S.T., M.Eng., D.Eng., I
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1. Neraca Air PT. X Cilegon. 11
Gambar II.2. Diagram alir pengolahan limbah cair industri biodiesel. 16
Gambar II.3. Equalization tank. 17
Gambar II.4. Diagram proses CF (Amiri et al., 2022). 19
Gambar II.5. Prinsip kerja DAF (Ali & Aziz, 2023). 24
Gambar II.6. Skema proses MBR (Hernaningsih, 2018). 30
Gambar II.7. Skema integrasi proses CF, DAF dan MBR. 36
Gambar III.1. Diagram alir penelitian. 42
Gambar III.2. Skema proses penelitian. 44
Gambar IV.1. Pengaruh Variasi Dosis Tawas Tehadap Kadar COD dengan Skema Proses CF + DAF. 53
Gambar IV.2. Pengaruh Variasi Dosis Tawas Tehadap Kadar BOD_5 dengan Skema Proses CF + DAF. 54
Gambar IV.3. Pengaruh Variasi Dosis Tawas Tehadap Kadar TSS dengan Skema Proses CF + DAF. 55
Gambar IV.4. Pengaruh Variasi Dosis Tawas Tehadap Kadar pH dengan Skema Proses CF + DAF. 57
Gambar IV.5. Pengaruh Variasi Dosis Tawas Tehadap Kadar Minyak dan Lemak dengan Skema Proses CF + DAF. 58
Gambar IV.6. Pengaruh Variasi Dosis PAC Tehadap Kadar COD dengan Skema Proses CF + DAF. 60
Gambar IV.7. Pengaruh Variasi Dosis PAC Tehadap Kadar BOD_5 dengan Skema Proses CF + DAF. 60
Gambar IV.8. Pengaruh Variasi Dosis PAC Tehadap Kadar TSS dengan Skema Proses CF + DAF. 63
Gambar IV.9. Pengaruh Variasi Dosis PAC Tehadap Kadar pH dengan Skema Proses CF + DAF. 64
Gambar IV.10. Pengaruh Variasi Dosis PAC Tehadap Kadar Minyak dan Lemak dengan Skema Proses CF + DAF. 65
Gambar IV.11. Pengaruh Variasi Skema Proses Pengolahan Tehadap Kadar COD untuk Dosis Koagulan Optimum. 67

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Biodiesel PT X Cilegon serta Analisis Tekno-Ekonomi
Irwan Mulyadi, Prof. Ir. Rochim Bakti Cahyono, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM.; Ir. Yuni Kusumastuti, S.T., M.Eng., D.Eng., I
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar IV.12. Pengaruh Variasi Skema Proses Pengolahan Tehadap Efisiensi Penyisihan COD untuk Dosis Koagulan Optimum 68
Gambar IV.13. Pengaruh Variasi Skema Proses Pengolahan Tehadap Kadar BOD_5 untuk Dosis Koagulan Optimum..... 70
Gambar IV.14. Pengaruh Variasi Skema Proses Pengolahan Tehadap Efisiensi Penyisihan BOD_5 untuk Dosis Koagulan Optimum..... 70
Gambar IV.15. Pengaruh Variasi Skema Proses Pengolahan Tehadap Kadar TSS untuk Dosis Koagulan Optimum..... 73
Gambar IV.16. Pengaruh Variasi Skema Proses Pengolahan Tehadap Efisiensi Penyisihan TSS untuk Dosis Koagulan Optimum..... 73
Gambar IV.17. Pengaruh Variasi Skema Proses Pengolahan Tehadap Kadar pH untuk Dosis Koagulan Optimum..... 75
Gambar IV.18. Pengaruh Variasi Skema Proses Pengolahan Tehadap Kadar Minyak dan Lemak untuk Dosis Koagulan Optimum 76
Gambar IV.19. Pengaruh Variasi Skema Proses Pengolahan Tehadap Efisiensi Penyisihan Minyak dan Lemak untuk Dosis Koagulan Optimum 77
Gambar IV.20. Diagram Blok Komparatif Konfigurasi Proses dan Peralatan Utama IPAL (Skema 1, Skema 2, dan Skema 3..... **Error! Bookmark not defined.**
Gambar IV.21. Grafik Batang Bertumpuk (*Stacked Bar Chart*) TAC dan LCOT..... 85
Gambar IV.22. Grafik Dinamika Akumulasi Biaya (*Cumulative Life Cycle Cost Curve*) . 86
Gambar IV.23. Grafik Dinamika Akumulasi Biaya (*Cumulative Life Cycle Cost Curve*) . 90
Gambar IV.24. Diagram Tornado (*Tornado Chart*) Untuk Analisis Sensitivitas LCOT.... 94

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Optimasi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Biodiesel PT X Cilegon serta Analisis Tekno-Ekonomi
Irwan Mulyadi, Prof. Ir. Rochim Bakti Cahyono, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM.; Ir. Yuni Kusumastuti, S.T., M.Eng., D.Eng., I
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel I.1. Baku mutu air limbah Industri minyak sawit (Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, 2014). 2
Tabel I.2. Rangkuman penelitian terdahulu terkait pengolahan limbah menggunakan teknologi CF, DAF dan MBR. 5
Tabel II.1. Karakteristik limbah cair industri biodiesel (Hakim et al., 2025). 12
Tabel II.2. Rangkuman jenis koagulan yang digunakan dalam pengolahan limbah cair. 20
Tabel II.3. Rangkuman berbagai penelitian yang menggunakan teknologi DAF. 25
Tabel II.4. Komponen utama CAPEX (Gholami et al., 2021). 39
Tabel II.5. Komponen utama OPEX (Gholami et al., 2021). 39
Tabel IV.1. Hasil Analisis Awal Kualitas Limbah Cair Biodiesel. 51
Tabel IV.2. Basis Perhitungan dan Asumsi 79
Tabel IV.3. Perbandingan CAPEX untuk Ketiga Skema (dalam Juta Rupiah) 80
Tabel IV.4. Perbandingan OPEX Tahunan (dalam Juta Rupiah/Tahun) 81
Tabel IV.5. Hasil Perhitungan LCOT 85
Tabel IV.6. Parameter Perhitungan IRR Inkremental (Skema 3 terhadap Skema 2) 88
Tabel IV.7. Akumulasi Pengembalian Modal Inkremental 89
Tabel IV.8. Matriks Iterasi Faktor Diskonto dan *Present Value* (PV) Inkremental 89
Tabel IV.9. Matriks Hasil Analisis Sensitivitas LCOT Skema 3 (Kondisi Basis LCOT = Rp 21.259/m³) 92