UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Algoritma Multi-Objective Adaptive Large Neighborhood Search untuk Penjadwalan Maintenance: Aplikasi
pada Sistem Membran Ultrafiltration**
Fairuzzaky Ramadhan, Achmad Pratama Rifai, S.T., M.Eng., Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

COVER i
HALAMAN PENGESAHAN iv
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI v
HALAMAN PERSEMBAHAN vi
KATA PENGANTAR vii
UCAPAN TERIMA KASIH ix
DAFTAR ISI x
DAFTAR GAMBAR xvi
DAFTAR TABEL xviii
DAFTAR SINGKATAN xxi
INTISARI xxii
ABSTRACT xxiii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Asumsi dan Batasan Masalah 4
1.4 Tujuan Penelitian 5
1.5 Manfaat Penelitian 6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7
2.1 Algoritma Optimasi Multi-Objektif 7
2.1.1 Pendekatan Berbasis Populasi: NSGA-II 7
2.1.2 *Large Neighborhood Search* dan Mekanisme Adaptif 8
2.1.3 Ekstensi Multi-Objektif (MOALNS) 9
2.1.4 Evaluasi dan Pemilihan Pendekatan Algoritma 9

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Algoritma Multi-Objective Adaptive Large Neighborhood Search untuk Penjadwalan Maintenance: Aplikasi
pada Sistem Membran Ultrafiltration**
Fairuzzaky Ramadhan, Achmad Pratama Rifai, S.T., M.Eng., Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2.2 Optimasi Pemeliharaan Membran 10
2.3 Penjadwalan Pemeliharaan Preventif 11
2.3.1 Klasifikasi dan Model Penjadwalan PM 12
2.3.2 Optimasi Multi-Objektif pada Penjadwalan PM 12
2.3.3 Penjadwalan PM pada Sistem Pengolahan Air 13
2.4 Kesenjangan Penelitian dan Posisi Kebaruan 14
2.4.1 Analisis Kesenjangan Penelitian 14
2.4.2 Posisi dan Kontribusi Penelitian 16
BAB III LANDASAN TEORI 18
3.1 Karakteristik Sistem Filtrasi Membran *Ultrafiltration* 18
3.1.1 Prinsip Kerja Membran *Ultrafiltration* 18
3.1.2 Fenomena *Fouling* pada Membran 19
3.1.3 Metode Pembersihan Membran 19
3.1.3.1 Pembersihan Fisik (*Water Cleaning*) 19
3.1.3.2 Pembersihan Kimia (*Chemical Cleaning*) 20
3.1.4 Karakteristik Sistem sebagai Basis Pemilihan Pendekatan Optimasi 21
3.2 Penjadwalan Pemeliharaan (*Maintenance Scheduling*) 22
3.2.1 Klasifikasi Strategi Pemeliharaan 23
3.2.2 Model Matematika Penjadwalan PM 23
3.2.3 Penjadwalan PM Multi-Objektif pada Sistem Paralel 24
3.3 Optimasi Multi-Objektif 25
3.3.1 Definisi Masalah Multi-Objektif 25
3.3.2 *Pareto Front* 27
3.3.3 Metrik Evaluasi Performa 28
3.4 *Adaptive Large Neighborhood Search* 29
3.4.1 Mekanisme *Destroy-Repair* dengan Pembelajaran Adaptif ... 30

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Algoritma Multi-Objective Adaptive Large Neighborhood Search untuk Penjadwalan Maintenance: Aplikasi
pada Sistem Membran Ultrafiltration**
Fairuzzaky Ramadhan, Achmad Pratama Rifai, S.T., M.Eng., Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.4.2 Kriteria Penerimaan *Simulated Annealing* 31
3.5 *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* II 31
3.5.1 *Non-dominated Sorting* dan *Crowding Distance* 31
3.5.2 Operator Genetika dan Parameter 32
BAB IV METODE PENELITIAN 33
4.1 Objek Penelitian 33
4.1.1 Sumber Data Industri 33
4.1.2 Karakteristik Sistem UF 33
4.1.3 Data Operasional 36
4.2 Alat Penelitian 37
4.2.1 Perangkat Keras 38
4.2.2 Perangkat Lunak 38
4.2.3 *Framework* Optimasi 39
4.3 Tahapan Penelitian 40
4.3.1 Diagram Alir Penelitian 40
4.3.2 Pengumpulan dan Eksplorasi Data 43
4.3.3 *Data Pre-processing* 43
4.3.4 Formulasi Model Matematis 44
4.3.5 Pengembangan dan Implementasi Algoritma 45
4.3.6 Implikasi untuk Konfigurasi Algoritma 46
4.3.7 Rancangan dan Pelaksanaan Eksperimen 46
4.3.8 Analisis Hasil dan Validasi 47
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN 48
5.1 Formulasi Model Matematis 48
5.1.1 Deskripsi Masalah dan Asumsi 48
5.1.2 Notasi Matematis 49
5.1.3 Fungsi Tujuan 52

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Algoritma Multi-Objective Adaptive Large Neighborhood Search untuk Penjadwalan Maintenance: Aplikasi
pada Sistem Membran Ultrafiltration**
Fairuzzaky Ramadhan, Achmad Pratama Rifai, S.T., M.Eng., Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5.1.3.1 Minimisasi Biaya Pembersihan 52
5.1.3.2 Minimisasi Kehilangan Produksi 52
5.1.3.3 Justifikasi Pemilihan Fungsi Objektif..... 53
5.1.4 Batasan Operasional 53
5.1.5 Verifikasi dan Validasi Model 56
5.1.6 Representasi Solusi 57
5.1.7 Model Perhitungan *Flowrate* 58
5.2 Pengembangan Algoritma MOALNS..... 59
5.2.1 Arsitektur Algoritma MOALNS..... 60
5.2.2 Pseudocode Algoritma MOALNS..... 61
5.2.3 Desain Operator *Destroy* Spesifik Domain 62
5.2.4 Desain Operator *Repair* Spesifik Domain 64
5.2.5 Kriteria Penerimaan Multi-Objektif..... 66
5.2.6 Manajemen *Pareto Archive* 68
5.2.7 Mekanisme *Adaptive Weight Update*..... 69
5.2.8 Kalibrasi Parameter Algoritma MOALNS..... 70
5.2.8.1 Metodologi OFAT 70
5.2.8.2 Parameter MOALNS yang Dikalibrasi 70
5.2.8.3 Hasil Kalibrasi MOALNS..... 71
5.2.8.4 Konfigurasi Final MOALNS 72
5.3 Konfigurasi Algoritma NSGA-II 74
5.3.1 Parameter NSGA-II 74
5.3.1.1 Parameter NSGA-II yang Dikalibrasi..... 74
5.3.1.2 Hasil Kalibrasi NSGA-II 75
5.3.1.3 Konfigurasi Final NSGA-II 75
5.3.2 Pseudocode Algoritma NSGA-II..... 76
5.3.3 Operator Genetika untuk Masalah Penjadwalan..... 77

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Algoritma Multi-Objective Adaptive Large Neighborhood Search untuk Penjadwalan Maintenance: Aplikasi
pada Sistem Membran Ultrafiltration**
Fairuzzaky Ramadhan, Achmad Pratama Rifai, S.T., M.Eng., Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5.3.3.1 *Tournament Selection* 77
5.3.3.2 *Single-Point Crossover* 78
5.3.3.3 *Bit-Flip Mutation* 78
5.4 Hasil Eksperimen 79
5.4.1 Diskusi Hasil Performa Algoritma 79
5.4.1.1 Analisis Visual *Pareto Front* per *Instance* 79
5.4.1.2 Perbandingan Kuantitatif *Across Instances* 84
5.4.2 Analisis Hasil Performa Algoritma 86
5.4.2.1 Superioritas *Hypervolume* MOALNS 87
5.4.2.2 Keunggulan *Spacing* NSGA-II 88
5.4.2.3 Implikasi Eksplorasi-Eksploitasi 90
5.5 Analisis Konvergensi 91
5.6 Perbandingan dengan Sistem Pembersihan Eksisting 92
5.6.1 Metodologi Analisis Komparatif 92
5.6.2 Profil Sistem Eksisting sebagai *Baseline* 93
5.6.3 Perbandingan Langsung: *Baseline* vs. Solusi MOALNS 94
5.6.4 Konsistensi Peningkatan Lintas *Instance* 96
5.7 Implikasi Praktis dan *Managerial Insight* 98
5.7.1 Sistem Rekomendasi Multi-Kriteria 98
5.7.2 Seleksi Solusi Berbasis Skenario 99
5.7.3 Implikasi Asumsi Degradasi Linier 100
5.7.4 Adaptasi Framework terhadap Perubahan Kondisi Operasional 101
5.7.5 Tahapan Implementasi 101
BAB VI PENUTUP 103
6.1 Kesimpulan 103
6.2 Saran 104

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Algoritma Multi-Objective Adaptive Large Neighborhood Search untuk Penjadwalan Maintenance: Aplikasi
pada Sistem Membran Ultrafiltration**
Fairuzzaky Ramadhan, Achmad Pratama Rifai, S.T., M.Eng., Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

6.2.1 Pengembangan Model 105
6.2.2 Peningkatan Algoritma 105
6.2.3 Ekstensi Aplikasi 105
DAFTAR PUSTAKA 106
LAMPIRAN L-1
LAMPIRAN A: *PSEUDOCODE* DAN *FLOWCHART* ALGORITMA L-1
L.1 *Pseudocode* Algoritma MOALNS L-1
L.2 *Pseudocode* Algoritma NSGA-II L-4
LAMPIRAN B: DATA EKSPERIMEN DAN ANALISIS DETAIL L-7
L.3 Metrik Performa Komprehensif L-7
L.4 Analisis Detail per *Instance* L-9
L.5 Analisis Distribusi Solusi per *Region* L-10
L.6 Nilai Objektif Hasil Optimasi per Skenario Strategis L-12
LAMPIRAN C: PARAMETER SISTEM DAN *PREPROCESSING* L-13
L.7 Konfigurasi Topologi Sistem UF L-13
L.8 Metodologi *Preprocessing* Data L-13
L.9 Analisis *Increment* Pembersihan Air L-14
L.10 Analisis Laju Degradasi Filter L-16
L.10.1 Identifikasi Periode Operasional L-16
L.10.2 Regresi Linear Kondisional L-17
L.10.3 Hasil Analisis Degradasi Filter L-18
L.11 *Breakdown* Komponen Biaya L-19
L.11.1 Komponen Biaya Pembersihan Air L-19
L.11.2 Komponen Biaya Pembersihan Kimia L-20
LAMPIRAN D: *VERIFICATION* DAN *VALIDATION* MODEL L-22
L.12 Verifikasi dan Validasi Model Matematis L-22