TESIS

TINJAUAN KARAKTERISTIK DAN ALTERNATIF TEKNOLOGI PENGOLAHAN AIR LIMBAH BERDASARKAN TIPE RUMAH SAKIT DI INDONESIA

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Magister (S2) Teknik Lingkungan

ANDI MUHAMMAD FAISAL

22927003

PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2026

TINJAUAN KARAKTERISTIK DAN ALTERNATIF TEKNOLOGI PENGOLAHAN AIR LIMBAH BERDASARKAN TIPE RUMAH SAKIT DI INDONESIA

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Magister (S2) Teknik Lingkungan

Disetujui,
Dosen Pembimbing

Pembimbing 1

Dr.Eng. Ir. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng., IPM
NIK. 925110102
Tanggal: 24 Agustus 2026

Pembimbing 2

Dr. Ir. Andik Yulianto, ST., M.T., IPM
NIK. 025100407
Tanggal: 26 Agustus 2026

Mengetahui,
Ketua Program Studi Magister Teknik Lingkungan FTDI UII

Dr. Ir. Andik Yulianto, ST., M.T., IPM
NIK. 025100407
Tanggal: 26 Agustus 2026

HALAMAN PENGESAHAN

TINJAUAN KARAKTERISTIK DAN ALTERNATIF TEKNOLOGI PENGOLAHAN AIR LIMBAH BERDASARKAN TIPE RUMAH SAKIT DI INDONESIA

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji

Hari : Senin
Tanggal : 26 Agustus 2026

Disusun Oleh:

ANDI MUHAMMAD FAISAL
22927003

Tim Penguji:

Dr.Eng. Ir. Awaluddin Nurmiyanto, S.T., M.Eng., IPM)
Dosen Penguji I



Dr. Ir. Andik Yulianto, S.T., M.T., IPM ( )
Dosen Penguji II



Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.ScES., Ph.D., IPU ( )
Dosen Penguji III



PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini adalah merupakan gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan Dosen Pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sangsi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sangsi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 26 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,



ANDI MUHAMMAD FAISAL

NIM: 22927003

KATA PENGANTAR

Assalaamu'alaikum wa rahmatullahi wa barakaatuh.

Puji dan syukur kita panjatkan kehadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala rahmat dan karunianya bagi kita semua. Shalawat dan salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad Shallallahu Alaihi wa Sallam beserta kelurga, sahabat, dan seluruh pengikutnya hingga akhir zaman.

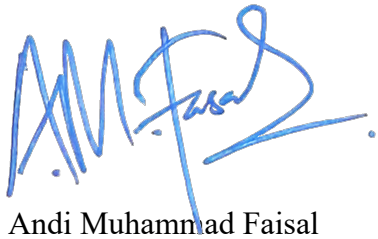
Alhamdulillahi rabbil 'aalamiin, Tesis dengan judul Tinjauan Karakteristik dan Alternatif Teknologi Pengolahan Air Limbah berdasarkan Tipe Rumah Sakit di Indonesia ini dapat selesaikan. Tesis ini merupakan hasil penelitian yang saya lakukan dalam rangka memenuhi persyaratan memperoleh derajat Magister Teknik Lingkungan.

Pada akhirnya saya mengucapkan Terima Kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan dan dukungan dalam menyelesaikan tesis ini. Sebagai penulis, saya menyadari terdapat kekurangan dalam isi materi dalam tesis ini, dan hal tersebut menjadi proses perbaikan saya kedepannya.

Wassalaamu'alaikum wa rahmatullahi wa barakaatuh.

Yogyarta, 26 Agustus 2026

Penulis,



Andi Muhammad Faisal

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi karakteristik air limbah rumah sakit berdasarkan tipe (A, B, C, dan D) serta mengevaluasi opsi teknologi pengolahan yang sesuai. Studi dilakukan karena terbatasnya kajian yang membahas perbedaan kualitas air limbah secara spesifik menurut tipologi rumah sakit di Indonesia. Data diperoleh dari empat rumah sakit di Daerah Istimewa Yogyakarta dengan tipe berbeda selama tiga triwulan pengamatan, bekerja sama dengan laboratorium lingkungan terakreditasi. Parameter yang dianalisis meliputi pH, BOD, COD, TSS, MBAS, Fenol, Minyak dan Lemak, Amoniak, serta Bakteri *Coliform*. Hasil karakterisasi menunjukkan konsentrasi tertinggi yaitu TSS 129 mg/L; pH stabil 6–9; BOD 215 mg/L; COD 413 mg/L; MBAS 0,08 mg/L; Fenol 0,931 mg/L; Minyak dan Lemak 11,8 mg/L, Amoniak Bebas 0,287 mg/L, dan *Coliform* 2.600 MPN/100 mL. Rasio BOD/COD berada pada 0,3–0,5 yang menunjukkan biodegradabilitas moderat. Evaluasi kualitas air limbah (*outlet*) mengindikasikan seluruh parameter pada semua tipe rumah sakit memenuhi baku mutu nasional. Efisiensi penyisihan mencapai BOD 75–90%; COD 75–88%; TSS 60–90%; Amoniak Bebas 60–80%; MBAS 10–45%; Fenol 40–60%; Minyak dan Lemak 70–75%, serta *Coliform* 80–95%. Analisis teknologi menunjukkan RS tipe A dapat menggunakan lumpur aktif, biofilter *anaerob-aerob*, UASB, ABR, MBR, dan MBBR. RS tipe B disarankan lumpur aktif, UASB, dan ABR; RS tipe C lumpur aktif konvensional atau ABR; sedangkan RS tipe D lumpur aktif *extended aeration*, ABR, atau SBR. Hasil penelitian menegaskan bahwa selain teknologi yang tercantum dalam pedoman nasional, terdapat alternatif teknologi lain yang layak dipertimbangkan sesuai variasi tipe rumah sakit dan karakteristik air limbah, terutama untuk parameter persisten.

Kata Kunci: Karakteristik, Air Limbah, Rumah Sakit, IPAL

ABSTRACT

This study aims to identify the characteristics of hospital wastewater based on hospital types (A, B, C, and D) and to evaluate suitable treatment technology options. The research was conducted due to the limited studies addressing wastewater quality variations according to hospital typologies in Indonesia. Data were collected from four hospitals of different types in Yogyakarta Special Region over three monitoring quarters, in collaboration with an accredited environmental laboratory. Parameters analyzed included pH, BOD, COD, TSS, MBAS, phenol, oil and grease, ammonia, and coliform bacteria. The results showed maximum concentrations of TSS 129 mg/L; pH stable at 6–9; BOD 215 mg/L; COD 413 mg/L; MBAS 0.08 mg/L; Phenol 0.931 mg/L; Oil and Grease 11.8 mg/L; Free Ammonia 0.287 mg/L; and Coliform 2,600 MPN/100 mL. The BOD/COD ratio ranged from 0.3 to 0.5, indicating moderate biodegradability. Effluent analysis demonstrated that all hospital types complied with national discharge standards. Removal efficiencies were BOD 75–90%, COD 75–88%, TSS 60–90%, free ammonia 60–80%, MBAS 10–45%, phenol 40–60%, oil and grease 70–75%, and coliform 80–95%. Technology assessment indicated that Type A hospitals are suitable for activated sludge, aerobic–anaerobic biofilter, UASB, ABR, MBR, and MBBR. Type B hospitals are recommended to use activated sludge, UASB, and ABR. Type C hospitals can apply conventional activated sludge or ABR, while Type D hospitals are better suited for extended aeration activated sludge, ABR, or SBR. The findings emphasize that, beyond the technologies listed in Indonesia's national guidelines, alternative treatment processes are worth considering to address varying hospital types and wastewater characteristics, particularly in removing persistent parameters.

Keywords: *Characteristics, Wastewater, Hospital, WWTP*

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN ..... **i**
PERNYATAAN ..... **ii**
KATA PENGANTAR ..... **iii**
ABSTRAK ..... **iv**
DAFTAR ISI ..... **vi**
DAFTAR TABEL ..... **ix**
DAFTAR GAMBAR ..... **x**

BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Ruang Lingkup 3
1.5 Manfaat Penelitian 4
1.6 Kerangka Berpikir 4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA **6**
2.1. Klasifikasi Rumah Sakit 6
2.2. Sumber Air Limbah Rumah Sakit 8
2.3. Debit Air Limbah Rumah Sakit 11
2.4. Karakteristik Air Limbah Rumah Sakit 12
2.5. Baku Mutu Air Limbah Rumah Sakit 15
2.6. Teknologi Pengolahan Air Limbah Rumah Sakit 16

BAB III METODE PENELITIAN **21**
3.1. Pengumpulan Data 21
3.1.1 Metode Pengumpulan Data 21
3.1.2 Jenis dan Jumlah Data 21
3.1.3 Waktu dan Lokasi 21
3.2. Uji Laboratrium 21

3.3. Prosedur Analisis Data 22
3.3.1 Analisis Deksriptif 22
3.3.2 Pemilihan Opsi Teknologi 23
3.3.3 Interpretasi Hasil Penelitian 23

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 24
4.1. Pengumpulan Data Karakteristik Kualitas Air Limbah RS 24
4.2. Analisa Karakteristik Air Limbah Rumah Sakit (Inlet IPAL) 25
4.2.1 TSS 25
4.2.2 pH 26
4.2.3 BOD 27
4.2.4 COD 28
4.2.5 MBAS 29
4.2.6 Fenol 30
4.2.7 Minyak dan Lemak 30
4.2.8 Amoniak Bebas 31
4.2.9 Bakteri *Coliform* 32
4.2.10 Rasio BOD/COD 33
4.3. Analisa Kualitas Air Limbah Olahan IPAL Rumah Sakit (*Outlet* IPAL) 34
4.4. Analisa Performa Pengolahan IPAL Rumah Sakit 40
4.4.1. Analisa Performa Pengolahan IPAL Rumah Sakit Tipe A 40
4.4.2. Efisiensi Removal IPAL Rumah Sakit Tipe B 42
4.4.3. Analisa Performa Pengolahan IPAL Rumah Sakit Tipe C 43
4.4.4. Analisa Performa Pengolahan IPAL Rumah Sakit Tipe D 45
4.5. Analisis Opsi Teknologi Pengolahan Air Limbah Rumah Sakit 46
4.5.1. Analisis Kesesuaian dengan Kriteria Desain Beban Pengolahan 50
4.5.2. Analisa Efisiensi Removal 55
4.5.2.1 Lumpur Aktif (*Activated Sludge*) 55
4.5.2.2 Biofilter Aerob-Anaerob 56
4.5.2.3 *Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB* 56
4.5.2.4 *Anarobic Baffled Reactor (ABR)* 57
4.5.2.5 *Sequence Batch Reactor (SBR)* 57
4.5.2.6 *Membran Bioreactor (MBR)* 57
4.5.2.7 *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) 57

4.5.3. Analisa Kebutuhan Lahan 63
4.5.4. Analisa Biaya Konstruksi (*Capital Expenditure*/CAPEX) 65
4.5.5. Analisa Biaya Operasi (*Operational Expenditure*/OPEX) 66
4.5.6. Analisa Kompleksitas Operasional & Pemeliharaan 69
4.5.7. Alternatif Teknologi IPAL Rumah Sakit 71

BAB V KESIMPULAN 77
4.1 Kesimpulan 77
4.2 Saran 78

DAFTAR PUSTAKA 79

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Tipe Kelas Rumah Sakit Umum di Indonesia.....6
Tabel 2. Sumber Air Limbah Rumah Sakit.....8
Tabel 3. Debit dan Kapasitas berdasarkan Layanan Minimal.....10
Tabel 4. Karakteristik Air Limbah Rumah Sakit di Jakarta.....11
Tabel 5. Karakteristik Air Limbah Rumah Sakit berbagai Daerah di Indonesia 11
Tabel 6. Faktor BOD/COD dalam Air Limbah.....12
Tabel 7. Baku Mutu Air Limbah Rumah Sakit.....13
Tabel 8. Efisiensi Penyisihan Parameter Air Limbah dengan Biofilter Anaerob Aerob 17
Tabel 9. Metode Uji Laboratorium 19
Tabel 10. Opsi Pemilihan Teknologi IPAL berdasarkan Kelompok Pencemar.....42
Tabel 11. Perhitungan Beban Pengolahan.....44
Tabel 12. Analisa Kesesuaian dengan Beban Pengolahan.....45
Tabel 13. Efisiensi Removal Teknologi Lumpur Aktif.....47
Tabel 14. Efisiensi Removal Biofilter Aerob Anaerob.....47
Tabel 15. Rekapitulasi Efisiensi Removal setiap Unit Teknologi 50
Tabel 16. Rekomendasi Teknologi IPAL berdasarkan Tipe Rumah Sakit 53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Kerangka Berpikir Penelitian 5
Gambar 2. Jumlah Rumah Sakit per Kelas (Nasional).....7
Gambar 3. Diagram Alir Proses Pengelolaan Air Limbah Rumah Sakit 9
Gambar 4. Skematik Proses Pengolahan Air Limbah dengan
Proses Biofilter Anaerob-Aerob 15
Gambar 5. Skematik Proses Pengolahan Air Limbah dengan
Proses Aerobik Lumpur Aktif.....16
Gambar 6. Diagram Alir Proses Pengelolaan Air Limbah dengan Biofilter.....17
Gambar 7. Karakteristik Inlet Parameter TSS.....22
Gambar 8. Karakteristik Inlet Parameter pH.....23
Gambar 9. Karakteristik Inlet Parameter BOD 24
Gambar 10. Karakteristik Inlet Parameter COD 25
Gambar 11. Karakteristik Inlet Parameter MBAS 26
Gambar 12. Karakteristik Inlet Parameter Fenol.....27
Gambar 13. Karakteristik Inlet Parameter Minyak dan Lemak 28
Gambar 14. Karakteristik Inlet Parameter Amoniak.....29
Gambar 15. Karakteristik Inlet Parameter Bakteri Coliform 29
Gambar 16. Rasio BOD/COD.....30
Gambar 17. Karakteristik Outlet Parameter TSS 31
Gambar 18. Karakteristik Outlet Parameter pH 32
Gambar 19. Karakteristik Outlet Parameter BOD.....32
Gambar 20. Karakteristik Outlet Parameter COD.....33
Gambar 21. Karakteristik Outlet Parameter MBAS.....33
Gambar 22. Karakteristik Outlet Parameter Fenol.....34
Gambar 23. Karakteristik Outlet Parameter Minyak dan Lemak.....34
Gambar 24. Karakteristik Outlet Parameter Amoniak 35
Gambar 25. Karakteristik Outlet Parameter Bakteri Coliform.....35
Gambar 26. Efisiensi Removal IPAL Rumah Sakit Tipe A.....36
Gambar 27. Efisiensi Removal IPAL Rumah Sakit Tipe B 37
Gambar 28. Efisiensi Removal IPAL Rumah Sakit Tipe C 38
Gambar 29. Efisiensi Removal IPAL Rumah Sakit Tipe D.....39

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aktivitas penggunaan air bersih di rumah sakit meliputi berbagai aktivitas seperti rawat inap, operasi, laboratorium, unit administrasi, *laundry*, dan dapur (Verlicchi, 2018). Berbagai aktivitas tersebut menghasilkan air limbah dengan kandungan bahan kimia, organisme mikrobiologi, antibiotik, pencucian alat radiologi (sinar x), disinfektan, dan obat-obatan yang merupakan senyawa berbahaya (Gafil dkk., 2023). Air limbah rumah sakit mengandung konsentrasi tinggi ammonia, total nitrogen, total padatan tersuspensi, dan bahan organik dengan *biodegradable* yang rendah berdasarakan rasio BOD/COD (Pérez-Bou dkk., 2024).

Di Indonesia, karakteristik air limbah rumah sakit memiliki kandungan yang sangat bervariasi, dari berbagai penelitian karakteristik air limbah dari berbagai kota di Indonesia seperti BOD 19,2-714,9 mg/L, COD 78 – 953,8 mg/L, TSS 46 – 716 mg/L, Amoniak 0,35 – 36,5 mg/L dan Total Coliform 1.038 – 1.600.000 mg/L. Karakteristik air limbah rumah sakit yang bervariasi sangat dipengaruhi oleh jenis layanan dan fasilitas seperti jumlah tempat tidur, jumlah pasien, dan ketersediaan laboratorium (Hocaoglu dkk., 2021).

Dampak buruk dari pembuangan air limbah rumah sakit yang tidak diolah atau diolah secara tidak memadai mencakup penyebaran penyakit menular, resistensi antibiotik, dan potensi toksisitas yang bisa menyebabkan kanker atau gangguan kesehatan lainnya (Ramírez-Coronel et al., 2023; Khan et al., 2024). Sebagian besar rumah sakit di negara berkembang tidak memiliki fasilitas pengolahan limbah yang memadai, memperburuk masalah pencemaran dan meningkatkan risiko kesehatan masyarakat (Khan et al., 2024). Penerapan teknologi pengolahan canggih, seperti proses biologis dan oksidasi lanjutan, sangat dibutuhkan untuk mengurangi dampak negatif air limbah rumah sakit dan mencegah kerusakan lingkungan lebih lanjut (Fatimazahra et al., 2023).

Sesuai dengan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2020 tentang Klasifikasi dan Perizinan Rumah Sakit, klasifikasi rumah sakit terdiri atas Rumah Sakit umum kela A dengan kapasitas paling sedikit 250 tempat tidur, kelas B paling sedikit 200 tempat tidur, kelas C paling sedikit 100 tempat tidur, dan kelas D paling sedikit 50 tempat tidur. Baku mutu air limbah rumah sakit juga diatur dalam Peraturan Menteri

Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah – Lampiran XLIV Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Fasilitas Pelayanan Kesehatan meliputi parameter fisika (suhu, zat padat terlarut, zat pada tersuspensi), kimia (pH, BOD, COD, TSS, Minyak dan Lemak, MBAS, Amoniak Nitrogen) dan total coliform.

Penelitian ini mencoba untuk menganalisis secara deskriptif perbedaan karakteristik air limbah dari berbagai kelas rumah sakit di Indonesia yang memiliki kapasitas dan fasilitas yang berbeda-beda, serta alternatif pengolahan air limbah yang dapat digunakan. Metode analisis deskriptif dapat membantu proses analisis berdasarkan data historis yang dapat membentuk pola dan kecenderungan (*trend*), sehingga dapat membantu dalam hal pengambilan keputusan (Geetha & Sujatha, 2024). Dalam penelitian bidang lingkungan, analisis deskriptif dapat digunakan untuk memberikan gambaran kondisi dan perubahan lingkungan (Davis, 2023), serta dapat digunakan untuk membentuk klaster dan pola pada kualitas air limbah (Severson et al., 2023).

Adapun teknologi pengolahan air limbah rumah sakit di Indonesia terdapat pedoman yaitu Pedoman Teknik IPAL dengan Sistem Aerobik Lumpur Aktif pada Fasilitas Pelayanan Kesehatan yang diterbitkan oleh Departemen Kesehatan Republik Indonesia Tahun 2009, serta Pedoman Teknis IPAL dengan Sistem Biofilter *Anaerob Aerob* pada Fasilitas Kesehatan yang diterbikan Kementerian Kesehatan Republik Indonesia Tahun 2011. Dengan berkembangnya teknologi IPAL saat ini, maka dalam penelitian ini juga akan mengkaji berbagai alternatif teknologi yang dapat diterapkan selain teknologi Lumpur Aktif dan *Biofilter Anaerob Aerob* yang telah tersedia di Indonesia.

Berdasarkan penelusuran berbagai penelitian kualitas air limbah di Indonesia, peneliti melihat bahwa kualitas air limbah yang sangat bervariasi. Selain karena waktu pengambilan sampel yang mempengaruhi, variasi ini juga dapat dipengaruhi oleh tipe rumah sakit di Indonesia yang memiliki kapasitas dan fasilitas yang berbeda pada setiap kelasnya. Mengingat bahwa berbagai penelitian tersebut di lakukan pada jumlah rumah sakit yang terbatas dan belum ada yang membedakan berdasarkan kelas rumah sakitnya, peneliti mencoba untuk menguraikan bagaimana kecenderungan karakteristik air limbah rumah sakit dan apa implikasi variasinya terhadap tipe/kelas rumah sakit di Indonesia. Perbedaan dalam karakteristik air limbah tersebut juga akan memberikan gambaran mengenai alternatif teknologi pengolahan air limbah rumah sakit yang sesuai dengan tipe/kelas rumah sakit.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat dirancang rumusan masalah dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1) Rumah sakit di Indonesia diklasifikasikan menjadi 4 (empat) tipe , yaitu tipe A, B, C, dan D, yang memiliki perbedaan dalam jenis layanan dan kapasitas tempat tidur. Berdasarkan studi literatur, air limbah rumah sakit memiliki karakteristik yang variatif dan dapat mempengaruhi teknologi pengolahan air limbah yang digunakan. Berbagai penelitian air limbah rumah sakit di Indonesia saat ini juga belum mempertimbangkan perbedaan tipe rumah sakit.
2) Perbedaan karakteristik air limbah rumah sakit juga dapat mempengaruhi teknologi pengolahan yang tepat. Saat ini, pedoman IPAL Rumah Sakit di Indonesia masih berfokus pada teknologi lumpur aktif dan *biofilter aerob-anaerob*, tanpa mempertimbangkan variasi karakteristik air limbah berdasarkan tipe rumah sakit.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan diatas, maka tujuan dari penelitian Tinjauan Kecenderungan Karakteristik Air Limbah Rumah Sakit dan Alternatif Teknologi Pengolahannya: Studi Berdasarkan Kelas Rumah Sakit di Indonesia ini yaitu sebagai berikut:

1) Melakukan karakterisasi air limbah rumah sakit yang bertujuan untuk mengidentifikasi komposisi dan tingkat pencemar pada setiap kelas rumah sakit.
2) Melakikan kajian opsi teknologi air limbah rumah sakit sesuai dengan tinjauan karakteristik air limbah guna menentukan pengolahan yang efektif dan efisien.

1.4 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup dari penelitian Tinjauan Kecenderungan Karakteristik Air Limbah Rumah Sakit dan Alternatif Teknologi Pengolahannya: Studi Berdasarkan Kelas Rumah Sakit di Indonesia ini yaitu sebagai berikut:

1) Objek penelitian yaitu air limbah dari masing-masing 1 (satu) unit rumah sakit pada setiap kelas rumah sakit. Klasifikasi rumah sakit yang diteliti sesuai dengan tipe kelas rumah rumah sakit yang berlaku di Indonesia yaitu Tipe A, Tipe B, Tipe C, dan Tipe D;

2) Penelitian ini dilakukan pada 4 (empat) rumah sakit yang berlokasi di Daerah Istimewa Yogyakarta yang dilakukan setiap pada 3 (tiga) triwulan selama Tahun 2024;
3) Data air limbah meliputi *inlet* dan *outlet* IPAL yang diperoleh dari hasil pengujian yang telah dilakukan oleh salah satu laboratorium yang terakreditasi Komite Akreditasi Nasional (KAN) dan teregistrasi sebagai Laboratorium Lingkungan.
4) Teknologi pengolahan air limbah rumah sakit yang dikaji secara literatur untuk menentukan efisiensi removal meliputi *primary treatment*, *secondary treatment*, dan *tertiary treatment*. Analisa tersebut digunakan untuk menentukan berbagai opsi pemilihan teknologi yang tepat guna bagi rumah sakit sesuai dengan kemampuan operasional dan keuangan.
5) Penelitian ini tidak mencakup analisis biaya serta pengelolaan limbah rumah sakit selain air limbah.
6) Rumah sakit yang dikaji adalah tipe rumah sakit umum

1.5 Manfaat Penelitian

1) Pendidikan dan Ilmu Pengetahuan

Penelitian ini akan memberikan tambahan referensi ilmiah mengenai kecenderungan karakteristik air limbah rumah sakit di Indonesia berdasarkan kelas rumah sakit, sehingga dapat menjadi dasar penelitian lanjutan.

2) Praktik Pengolahan Air Limbah Rumah Sakit

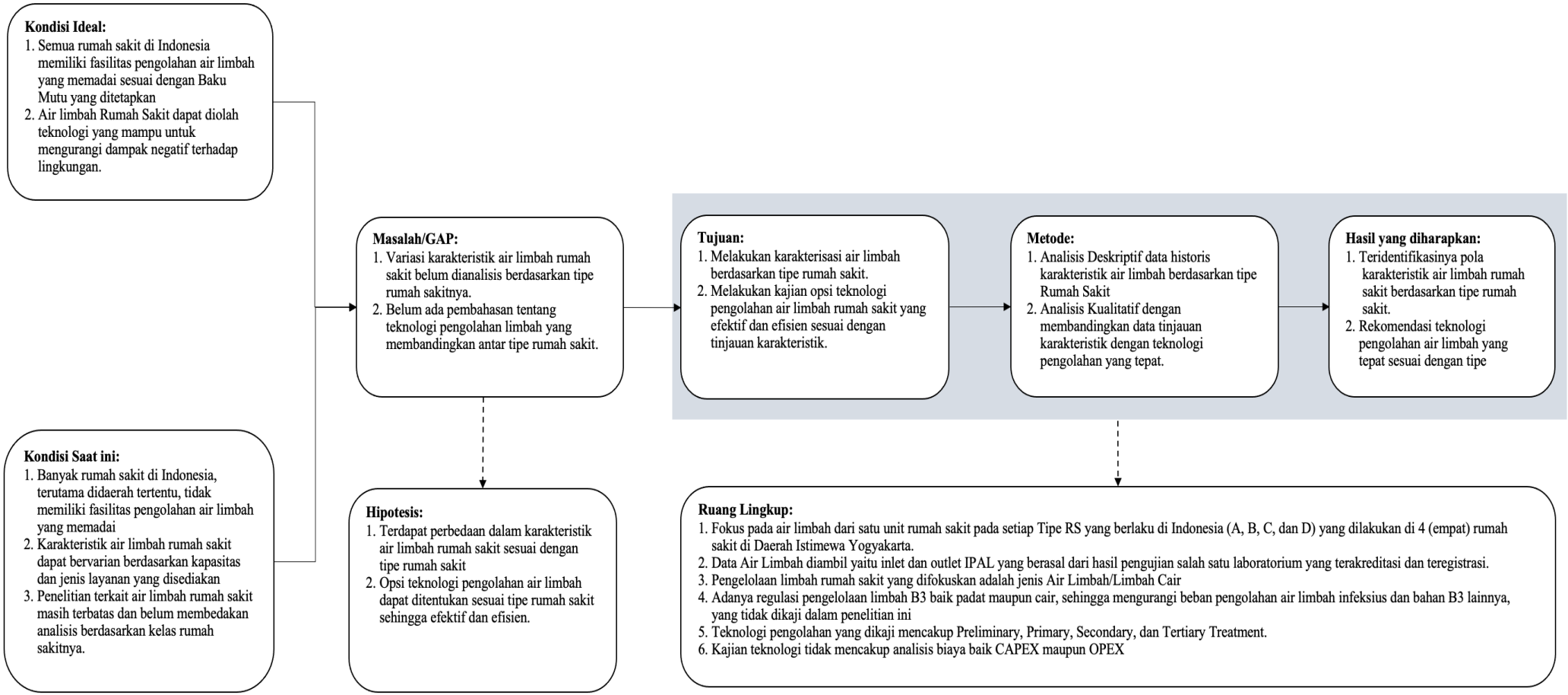
Penelitian ini dapat memberikan referensi bagi rumah sakit dalam memilih berbagai opsi teknologi pengolahan air limbah yang optimal sesuai karakteristiknya, sehingga dapat memenuhi baku mutu air limbah yang dipersyaratkan.

3) Pengambilan Kebijakan

Penelitian ini dapat memberikan masukan bagi pemerintah dan/atau *stakeholder* terkait dalam merancang kebijakan air limbah rumah sakit berdasarkan data dan analisis ilmiah, sehingga dapat meningkatkan pengelolaan lingkungan melalui pemilihan teknologi yang efektif dan efisien.

1.6 Kerangka Berpikir

Adapun tujuan dari penelitian Tinjauan Kecenderungan Karakteristik Air Limbah Rumah Sakit dan Alternatif Teknologi Pengolahannya: Studi Berdasarkan Kelas Rumah Sakit di Indonesia ini yaitu sebagai berikut.



Gambar 1. Kerangka Berpikir Penelitian

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Klasifikasi Rumah Sakit

Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2020 tentang Klasifikasi dan Perizinan Rumah Sakit, rumah sakit dapat diketagorikan menjadi 2 (dua) yaitu Rumah Sakit Umum dan Rumah Sakit Khusus. Rumah sakit umum memberikan pelayanan kesehatan pada semua bidang dan jenis penyakit, sedangkan rumah sakit khusus memberikan pelayanan utama pada suatu bidang atau satu jenis penyakit tertentu berdasarkan disiplin ilmu, golongan umur, organ, jenis penyakit atau kekhususan lainnya. Pelayanan kesehatan yang diberikan oleh rumah sakit umum paling sedikit terdiri atas pelayanan medik dan penunjang medik; pelayanan keperawatan dan kebidanan; dan pelayanan nonmedik.

a) Pelayanan medik dan penunjang medik terdiri atas:
   - Pelayanan medik umum, berupa pelayanan medik dasar
   - Pelayanan medik spesialis, berupa pelayanan medik spesialis dasar dan pelayanan medik spesialis berupa pelayanan medik spesialis dasar dan pelayaan medik spesialis lain. Pelayanan medik spesialis dasar yang dimaksud yaitu pelayanan penyakit dalam, anak, bedah, dan obstetri dan ginekologi.
   - Pelayanan subspesialis berupa pelayanan medik subspesialis dasar dan pelayanan medik subspesialis lain.
b) Pelayanan keperawatan dan kebidanan, meliputi asuhan keperawatan generalis dan/atau keperawatan spesialis, dan asuhan kebidanan.
c) Pelayanan non medik terdiri atas:
   - Pelayanan farmasi
   - Pelayanan *laundry*/binatu
   - Pengolahan makanan/gizi
   - Pemeliharaan prasarana dan alat kesehatan
   - Informasi dan komunikasi
   - Pemulsaran jenazah
   - Pelayanan nonmedik lainnya.

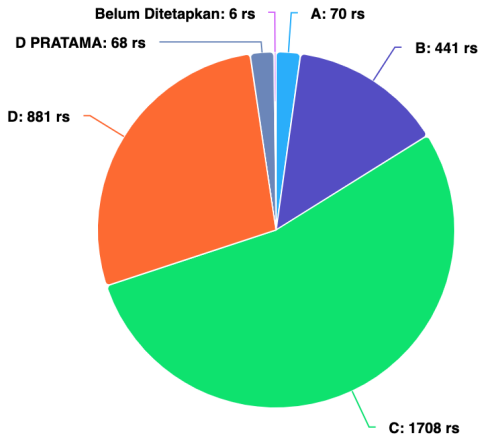
Rumah Sakit di Indonesia diklasifikasi dalam 4 (empat) kelas yaitu A, B, C, dan D (Listiyono, 2015). Pembagian kelas ini untuk memperkuat layanan yang berjenjang, fungsi rujukan, serta memperhatikan fasilitas dan kemampuan pelayanan (Oktamianti & Pebrina, 2017).

Tabel 1. Tipe Kelas Rumah Sakit Umum di Indonesia

Klasifikasi	**Pelayanan[1)]**	**Kapasitas[2)]**
Tipe A	Rumah sakit pusat dengan pelayanan medis lengkap termasuk spesialis dasar seperti penyakit dalam, kesehatan anak, bedah, dan obstetri-ginekologi.	250 tempat tidur
Tipe B	Rumah sakit tingkat tersier yang menyediakan layanan subspesialis serta menjadi rujukan lanjutan dari tipe C.	200 tempat tidur
Tipe C	Rumah sakit rujukan lanjutan diatas dari pelayanan kesehatan primer (tipe D) dengan layanan spesialis dan terkadang juga memberikan layanan subspesialis	100 tempat tidur
Tipe D	Rumah sakit dengan pelayanan hanya kesehatan dasar yaitu layanan umum dan kesehatan gigi.	50 tempat tidur

Sumber: [a)]Listiyono, 2005; [b)]Permenkes No. 3 Tahun 2020

Berdasarkan data sistem informasi rumah sakit (https://sirs.kemkes.go.id/), jumlah rumah sakit di Indonesia yaitu: tipe A (70 unit), tipe B (441 unit), tipe C (1708 unit), tipe D (881 unit) dan D Pratama (68 unit), serta yang belum ditetapkan (6 unit). Adapun tipe D Pratama hanya diselenggarakan di daerah tertinggal, perbatasan, atau kepulauan (Wulandari, dkk., 2024).



Sumber: Dirjen Pelayanan Kesehatan, 2024

Gambar 2. Jumlah Rumah Sakit per Kelas (Nasional)

2.2. Sumber Air Limbah Rumah Sakit

Jumlah timbulan air limbah yang dihasilkan oleh aktivitas rumah sakit dipengaruhi jumlah tempat tidur, jenis dan fasilitas kesehatan yang tersedia serta layanan yang diberikan seperti *laundry*, dapur, dsb. (Oliveira dkk., 2015; Majumder dkk., 2021). Dalam pedoman pengelolaan air limbah fasilitas kesehatan (WHO, 2014), jenis dan sumber air limbah yang dihasilkan sebagai berikut.

1. *Blackwater*: meliputi air limbah yang mengandung kotoran dan urin dengan konsentrasi tinggi
2. *Greywater*: mengandung sisa pencucian, mandi, proses laboratorium, *laundry*, dan proses teknis seperti air pendingin atau pembilasan/pencucian *film* Sinar-X.
3. *Stormwater*: bukan air limbah, namun air hujan yang terkumpul dari atap, pekarangan, tanah, dan permukaan lahan di rumah sakit.

Dalam pedoman teknis IPAL (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2011), sumber air limbah dibagi dalam berbagai kegiatan seperti perawatan medis (rawat inap, rawat jalan, rawat darurat, rawat intensif, hemodialisa, bedah sentral, dan rawat isolasi); laboratorium klinik dan kimia; ruang dapur; ruang cuci (*laundry*); ruang radiologi (sinar X); serta ruang radio-isotop.

Jika ditinjau dari aktivitasnya, air limbah rumah sakit terdiri dari aktivitas medis meliputi operasi, pertolongan pertama, penanganan darurat, laboratorium, diagnosa, radiologi, dsb., sedangkan aktivitas nonmedis seperti toilet, dapur, maupun kegiatan *laundry*, dsb. (Brelot dkk., 2013; Verlicchi, 2018). Berdasarkan uraian diatas, maka penelitian dapat merumuskan penjelasan mengenai sumber air limbah tersebut sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2.

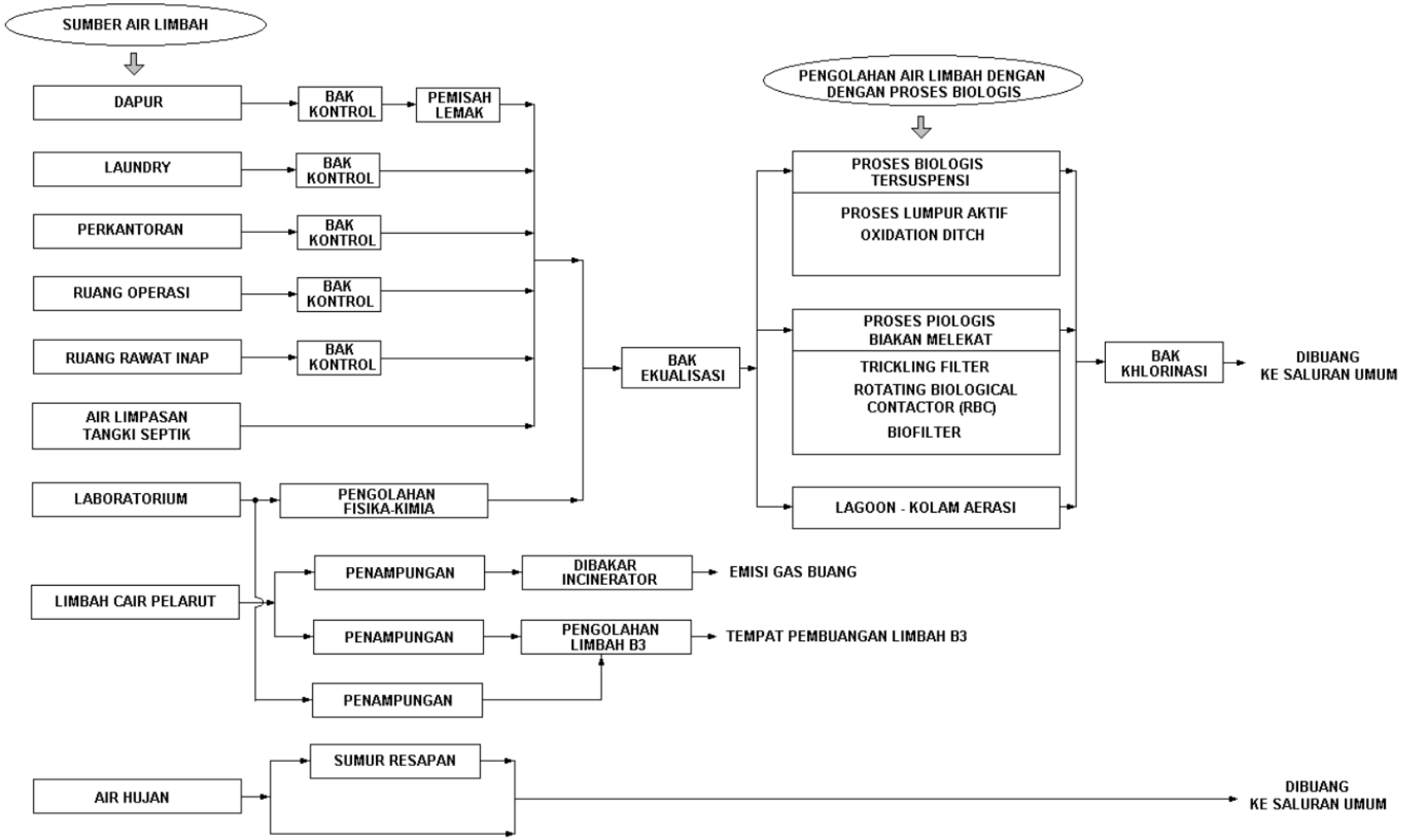
Tabel 2. Sumber Air Limbah Rumah Sakit

No.	Sumber	Penjelasan
A.	**Medis**	
1.	Perawatan Medis	Air limbah yang dihasilkan dari aktivitas perawatan, tindakan yang bersifat infeksius karena mengandung sisa darah dan jaringan dari pasien.
2.	Laboratorium	Air limbah yang dihasilkan dari sisa sampel uji termasuk bahan-bahan kimia, serta pencucian peralatan.
3.	Radiologi	Air limbah dihasilkan dari sisa pencucian/pembilasan film sinar X yang mengandung bahan kimia berbahaya.

No.	Sumber	Penjelasan
4.	Radio-Isotop	Air limbah dihasilkan dari sisa proses pencucian peralatan yang mengandung residu radio-isotop.
5.	Pemulsaran Jenazah	Air limbah dihasilkan dari sisa air pencucian atau pembersihan jenazah. Pada pasien-pasien yang terinfeksi penyakit khusus diperlukan pengelolaan tersendiri.
6.	Ruang Operasi	Air limbah dihasilkan dari sisa cairan tubuh pasien, darah, serta cairan pencuci peralatan dan lantai. Air limbah ini dapat mengandung mikroorganisme patogen, sisa obat-obatan anestesi, serta bahan kimia desinfektan, sehingga memerlukan pengelolaan khusus sebelum dibuang ke sistem IPAL.
B.	**Nonmedis**	
1.	Toilet	Air limbah *blackwater* dan *greywater* yang dihasilkan dari penggunaan toilet, baik digunakan oleh pasien, perawat, aktivitas kantor, pengunjung, dsb.
2.	Ruang Dapur	Air limbah yang dihasilkan dari sisa pencucian makanan dan peralatan.
3.	Ruang Cuci (*Laundry*)	Air limbah yang dihasilkan dari sisa pencucian linen kotor.

Sumber: Kemenkes RI 2011 dan Verlicchi, 2018

Dalam pengelolaan air limbah di Indonesia, air limbah yang termasuk dalam kategori limbah berbahaya dan beracun termasuk juga infeksius, diperlukan penanganan khusus sesuai dengan regulasi yang berlaku. Air limbah yang termasuk dalam kategori tersebut tidak diolah pada IPAL rumah sakit, melainkan diolah oleh pihak ketiga yang berizin dalam pengolahan limbah B3, sehingga konteks pada penelitian ini mengesampingkan parameter-parameter logam berat maupun parameter infeksius lainnya.



Sumber: Dirjen Bina Upaya Kesehatan - Kemenkes RI, 2011

Gambar 3. Diagram Alir Proses Pengelolaan Air Limbah Rumah Sakit

2.3. Debit Air Limbah Rumah Sakit

Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 7 Tahun 2019 tentang Kesehatan Lingkungan Rumah Sakit, minimum volume air yang disediakan oleh rumah sakit per tempat tidur per hari dibedakan antara rumah sakit kelas A dan B dengan rumah sakit kelas C dan D, karena perbedaan jenis layanan kesehatan yang diberikan antar kedua kelas rumah sakit tersebut yang ditampilkan pada Tabel 3. dibawah ini.

Tabel 3. Standar Kebutuhan Air menurut Kelas Rumah Sakit dan Jenis Layanan

Kelas RS / Jenis Rawat	Standar Kebutuhan Air	Satuan	Keterangan
Semua Kelas	5 – 7,5	L/TT/Hari	Kuantitas air minum
RS Tipe A-B	400 - 450	L/TT/Hari	Kuantitas air untuk keperluan higiene dan sanitasi
RS. Tipe C-D	200 – 300	L/TT/Hari	Kuantitas air untuk keperluan higiene dan sanitasi
Rawat Jalan	5	L/TT/Hari	Termasuk dalam volume air sesuai kelas RS

Sumber: Permenkes RI No. 7 Tahun 2019

a) Rumah sakit kelas A dan B harus menyediakan air minum 400 liter per tempat tidur per hari dan maksimum 450 liter per tempat tidur per hari. Volume maksimum ini dimaksudkan agar rumah sakit mempunyai upaya untuk menghemat pemakaian air agar ketersediannya tetap terjamin tanpa mengorbankan kepentingan pengendalian infeksi;
b) Rumah sakit kelas C dan D harus menyediakan air untuk keperluan higiene sanitasi minimum 200 liter per tempat tidur per hari dan maksimum 300 liter per tempat tidur per hari;
c) Volume air untuk kebutuhan rawat jalan adalah 5 liter per liter per orang per hari. Penyediaan air untuk rawat jalan sudah diperhitungan seperti tercantum pada butir a) dan b);
d) Keperluan air sesuai kelas rumah rumah sakit dan peruntukannya harus dapat dipenuhi setiap hari dan besaran volume air untuk higiene sanitasi tersebut sudah memperhitungkan kebutuhan air untuk pencucian linen, dapur gizi, kebersihan/penyiraman dan lainnya.

Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 40 Tahun 2022 tentang Persyaratan Teknis Bangunan, Prasarana, dan Peralatan Kesehatan Rumah Sakit, estimasi kapasitas air limbah minimal yaitu sebesar 500 Liter per Tempat Tidur (TT). Selanjutnya dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2019 tentang Kesehatan Lingkungan Rumah Sakit, desain kapasitas IPAL harus mempertimbangkan debit maksimal dengan nilai safety faktor sebesar + 10 %. Sementara itu dalam Permenkes Nomor 7 Tahun 2019, kebutuhan air bersih ditetapkan berdasarkan kelas rumah sakit yaitu antara 200 – 450 L/TT/hari. Ketidaksesuaian antara kebutuhan air bersih dan estimasi air limbah ini dapat dijelaskan dengan pendekatan timbulan air limbah aktual yang umumnya berkisar 70–80% dari total konsumsi air. Oleh karena itu, dalam estimasi debit air limbah sebaiknya disesuaikan dengan kebutuhan air bersih *riil* rumah sakit dan dikalikan dengan persentase timbulan serta faktor keamanan 10%, agar kapasitas IPAL mencerminkan kondisi operasional secara lebih efisien namun tetap memenuhi standar kesehatan lingkungan. Debit air limbah rumah sakit pada masing-masing kelas rumah sakit dapat dirangkum dalam Tabel 4. berikut.

Tabel 4. Debit dan Kapasitas IPAL berdasarkan Layanan Minimal

Tipe RS.	Layanan Minimal	Standar Kebutuhan Air	Total Kebutuhan Air	Persentase Timbulan Air Limbah (80%)	Safety Factor (10%)**	Kapasitas IPAL Minimal
RS. Tipe A	250 TT	450 L/TT	125 m^3	90 m^3	9 m^3	99 m^3
RS. Tipe B	200 TT	450 L/TT	100 m^3	72 m^3	7,2 m^3	79,2 m^3
RS. Tipe C	100 TT	300 L/TT	50 m^3	24 m^3	2,4 m^3	26,4 m^3
RS. Tpe D	50 TT	300 L/TT	25 m^3	12 m^3	1,2 m^3	13,2 m^3

Sumber: Hasil Analisis, 2025

2.4. Karakteristik Air Limbah Rumah Sakit

Air limbah rumah sakit terkadang dapat melebihi baku mutu seperti parameter BOD, COD, dan TSS, dimana parameter ini menunjukkan tingginya tingkat polutan organik dan organik yang disebabkan oleh penggunaan desinfektan dan bahan kimia lainnya (Tan & Rashid 2023). Karakteristik air limbah rumah sakit dilakukan dengan tinjauan pustaka dari berbagai literatur yang membahas mengenai konsentrasi *inlet* air limbah rumah sakit, khususnya di Indonesia.

Studi yang komperhensif dilakukan oleh PALD Jaya Tahun 1995 sebuah perusahaan pengelolaan air limbah di Jakarta yang melakukan uji karakteristik air limbah rumah sakit sebagai disajikan pada Tabel 5. berikut.

Tabel 5. Karakteristik Air Limbah Rumah Sakit di Jakarta

No.	Parameter	Satuan	Minimum	Maksimum	Rata-Rata
1	TSS	mg/L	27,5	211	119,25
2	pH	-	4,92	8,99	6,96
3	BOD	mg/L	31,52	675,33	353,43
4	COD	mg/L	46,62	1183,4	615,01
5	MBAS	mg/L	1,66	9,79	5,725
6	Fenol	mg/L	0,04	0,63	0,335
7	Minyak dan Lemak	mg/L	1,00	125	63
8	Amoniak	mg/L	10,79	158,73	84,76
9	Bakteri Coliform	MPN/100 ml	-	-	-

Sumber: PALD Jaya 1995; Dirjen Bina Upaya Kesehatan Kemenkes RI, 2011

Selanjutnya dilakukan studi literatur mengenai penelitan-penelitan karakteristik air limbah di berbagai daerah di Indonesian. Penentuan parameter karakteristik air limbah mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah – Lampiran XLIV Baku Mutu air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Fasilitas Kesehatan, meliputi parameter Suhu, Zat padat terlarut, zat padat tersuspensi, pH, BOD, COD, TSS, Minyak dan Lemak, MBAS, Amonia Nitrogen, dan Total Coliform. Selain itu ditambahkan parameter Phenol sesuai dengan Peraturan Daerah Istimewa Yogyakarta Nomor 7 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Limbah – Lampiran II Baku Mutu Air Limbah untuk Kegiatan Pelayanan Kesehatan. Berdasarkan hasil tinjauan literatur, terdapat beberapa penelitian yang diambil dari berbagai daerah di Indonesia untuk melihat konsentrasi *influent* air limbah rumah sakit yang ditampilkan pada Tabel 6. berikut.

Tabel 6. Karakteristik *Influent* Air Limbah Rumah Sakit berbagai Daerah di Indonesia

No.	Parameter	Satuan	Hasil Uji							
			a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)	h)
1.	TSS	mg/L	208	-	90	183,4	36,0	716	46	420
2.	pH	-	6,33	8,5	-	7,00	8,5	7,3	7,31	7,65
3.	BOD	mg/L	714,9	34	75,45	31,712	64,4	40,63	19,2	100,31
4.	COD	mg/L	953,8	78	192,4	129,40	161,4	134	223	323,59
5.	MBAS	mg/L	-	-	-	0,41	-	-	-	-
6.	Fenol	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-
7.	Minyak & Lemak	mg/L	-	-	-	0,52	-	-	9,0	17
8.	Amoniak	mg/L	4,60	-	22,45	34,00	0,35	0,6	36,5	2,24
9.	Bakteri Coliform	MPN/100 ml	1100	-	-	-	1.038	750. 000	$1,6x10^6$	2700

Sumber:
a) Yuwati, 2021; (Palembang, Sumatera Selatan)
b) Kalamu dkk., 2014; (Manado, Sulawesi Utara)
c) Alim & Noor, 2021; (Banjarmasin, Kalimantan Selatan)
d) Yenti, 2011; (Jakarta)
e) Dewi dkk., 2022 (Surabaya, Jawa Timur)
f) Agustina & Rudijanto, 2015; (Purbalingga, Jawa Tengah)
g) Adityosulindro dkk., 2023; (Depok, Jawa Barat)
h)Pharmawati & salman, 2024; (Bandung, Jawa Barat)

Berdasarkan rangkuman data karakteristik air limbah rumah sakit di Indonesia, diketahui kisaran *influent* air limbah yaitu parameter TSS 36,0 – 716 mg/L; pH 6,33 – 8,5; BOD 19,2 – 714,9 mg/L; COD 78 – 953,8 mg/L, Minyak dan Lemak 0,52 – 17 mg/L, Amoniak 0,35 – 36,65 mg/L, dan Bakteri Coliform 1.038 – 1.600.000 MPN/100 mL. Karakteristik air limbah juga dapat diklasifikasi berdasarkan faktor *biodegradable* dengan mengitung rasio BOD/COD. Rasio BOD/COD merupakan indikator yang sering digunakan untuk mengevaluasi biodegradabilitas air limbah (Rudaru et al., 2022), sehingga menjadi data penting untuk merancang IPAL yang optimal (Maddah, 2022). Dalam penelitian (Karungamye et al., 2023), rasio BOD/COD sebesar 0,5 untuk *influent* dan 0,4 untuk *effluent* yang menunjukkan bahwa kondisi biodegradabilitas air limbah rumah sakit berada pada kondisi yang moderat.

Tabel 7. Faktor BOD/COD dalam Air Limbah

Rasio BOD/CD	Indikator	Indikasi
>0,6	*Acceptable*	mudah diuraikan oleh miroorganisme; pengolahan biologis
0,3 – 0,6	*Biodegradable*	penguraian yang cukup oleh mikroorganisme; pengolahan biologis; kombinasi biologis-kimia
<0,3	*Non-Biodegradable*	sulit diurai oleh mikroorganisme secara alami; pengolahan biologis-kimia-fisika

Sumber: Srinivas, 2008

2.5. Baku Mutu Air Limbah Rumah Sakit

Baku mutu air limbah rumah sakit mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah – Lampiran XLIV Baku Mutu air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Fasilitas Kesehatan dan Peraturan Daerah Istimewa Yogyakarta Nomor 7 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Limbah – Lampiran II Baku Mutu Air Limbah untuk Kegiatan Pelayanan Kesehatan.

Tabel 8. Baku Mutu Air Limbah Rumah Sakit

No.	Parameter	Satuan	Nasional[1)]	Daerah[2)]		
				Kelas A	Kelas B & C	Kelas D & Khusus
A.	**Fisika**					
1.	Suhu	^{0}C	38	38	38	38
2.	Zat padat terlarut	mg/L	2.000	2.000	2.000	2.000
3.	Zat padat tersuspensi	mg/L	200	-	-	-
B.	**Kimia**					
4.	pH	-	6-9	6-9	6-9	6-9
5.	BOD	mg/L	50	30	30	50
6.	COD	mg/L	80	80	80	80
7.	TSS	mg/L	30	30	30	30
8.	Amoniak					
	Amoniak Nitrogen	mg/L	10	-	-	-
	Amoniak Bebas (NH_3-N)	mg/L	-	1	1	1

No.	Parameter	Satuan	Nasional[1)]	Daerah[2)]		
				Kelas A	Kelas B & C	Kelas D & Khusus
9.	MBAS	mg/L	10	5	5	5
10.	Minyak & Lemak		10	10	10	10
11.	Fenol	mg/L	-	0,5	0,5	0,5
C.	**Mikrobiologi**					
12.	Bakteri Coliform	MPN/ 100 ml	5.000	5.000	5.000	5.000

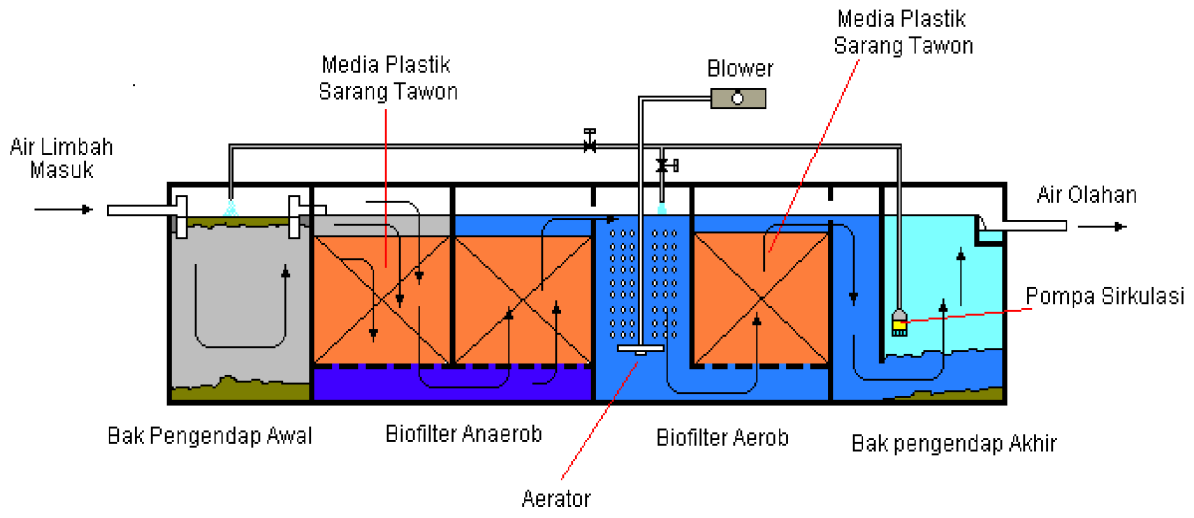
Sumber: 1) Permen LHK No. 5/2014; 2) Pergub DIY No. 7/2016

Pada Tabel 7. diatas dapat dilihat perbedaan jenis parameter, nilai baku mutu, maupun pembagian tipe kelas rumah sakit. Perbedaan-perbedaan tersebut dianggap sebagai hal baik, dimana regulasi nasional diajukan sebagai regulasi umum di Indonesia dan Pemerintah Daerah melakukan pengetatan baku mutu untuk menjaga beban pencemar yang ada didaerahnya sendiri.

2.6. Teknologi Pengolahan Air Limbah Rumah Sakit

Teknologi pengolahan air limbah rumah sakit di Indonesia pada umumnya menggunakan Biofilter *Anaerob-Aerob*, dimana Kementerian Kesehatan Rebuplik Indonesia pada Tahun 2011 telah mengeluarkan Pedoman Teknis Instalasi Pengolahan Air Limbah dengan Sistem Biofilter *Anaerob-Aerob* pada Fasilitas Pelayanan Kesehatan. Proses pengolahan air limbah rumah sakit yang direkomendasikan pada pedoman teknis tersebut dimulai dengan mengalirkan air limbah dari bak pengumpul atau bak ekualisasi ke Bak Pengendap Awal yang bertujuan untuk mengendapkan padatan berupa lumpur, pasir dan bahan organik yang tersuspensi. Selain itu, bak pengendap awal juga dapat berfungsi sebagai bak pengontrol aliran serta dapat menguraikan lumpur (*sludge digestion*). Setelah melewati proses di bak pengendap awal, air limbah kemudian dialirkan pada bak Biofilter *Anaerob-Aerob* dengan media filter Sarang Tawon. Pada bak Biofilter Anaerob, air limbah akan melalui 2 (dua) ruangan atau kompartemen sehingga terjadi penguraian bahan organik yang dilakukan oleh bakteri anaerobik. Dalam beberapa hari beroperasi, pada permukaan media filter akan bertumbuh lapisan-lapisan film mikroorganisme yang akan menguraikan zat organik yang belum sempat terurai pada bak pengendap awal. Setelah melewati proses pada bak Anaerob, air limbah kemudian dialirkan pada bak Biofilter Aerob yang juga tersusun dengan media filter Sarang Tawon dengan penambahan Aerator untuk menyisihkan zat organik. Air limbah yang

berkontak dengan mikroorganisme yang tersuspensi baik pada air maupun pada permukaan emdia akan meningkatkan penguraian zat organik, deterjen serta mempercepat proses nitrifikasi sehinga efisiensi penghilangan amonia menjadi lebih besar. Setalah proses biofilter air limbah kemudian dialirkan pada bak Pengendap Akhir, dimana sebagian air limbah dipompakan kembali ke bak Pengendap Awal dan sebagian diproses lebih lanjut dengan kontak *khlor* pada proses desinfeksi yang bertujuan untuk membunuh mikroorganisme patogen. Air yang telah melewati proses desinfeksi kemudian dapat dibuang dan/atau dimanfaatkan sesuai dengan regulasi yang berlaku. Adapun proses pengolahan air limbah tersebut dapat ditampilkan pada Gambar 4. berikut.



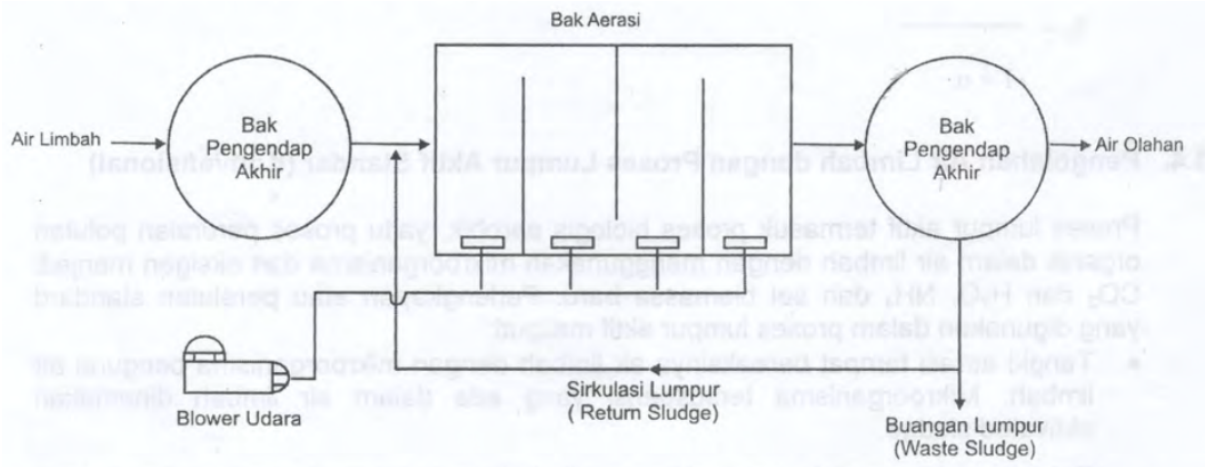
Sumber: Dirjen Bina Upaya Kesehatan Kemenkes RI, 2011

Gambar 4. Skematik Proses Pengolahan Air Limbah dengan Proses Biofilter *Anaerob-Aerob*

Selain menggunakan biofilter aerob anaerob, terdapat pedoman di Indonesia dengan teknologi lumpur aktif. Proses lumpur aktif termasuk proses biologis aerobik, yaitu proses penguraian polutan organik dalam air limbah dengan menggunakan mikroorganisme dan oksigen menjadi CO_2 dan H_2O, NH_4 dan sel biomassa baru.

- Tangki aerasi tempat bereaksi air limbah dengan mikroorganisem pengurai air limbah. Mikroorganisme tersuspensi yang ada dalam air limbah dinamakan *activated sludge*.
- Bak pengendap untuk memisahkan air limbah yang telah dimurnikan dari lumpur mikroorganisme.
- Sistem sirkulasi untuk mengembalikkan sebagian lumpur dari bak pengendap ke tangki aerasi. Sirkulasi ini digunakan untuk menjaga konsentrasi mikroorganisme dalam tangki aerasi. Tinggi rendahnya konsentrasi mikroorganisme dalam tangki aerasi merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi efisiensi pengolahan.

- Sistem pengolahan dan pembuangan kelebihan lumpur sebagai akibat dari pertumbuhan mikroorganisme.
- Peralatan pemasok udara seperti *blower* dan *difuser* udara.
- Sistem pengadukan seperti untuk membuat campuran mikroorganisme dan air limbah homogen serta tidak mencegah pengendapan lumpur dalam tangki aerasi. Sistem ini tidak perlu digunakan apabila suplai udara dalam kolam aerasi sudah cukup besar dan tidak terjadi pengendapan. Udara disalurkan melalui pompa *blower* (*difussed*) atau melalui aerasi mekanik. Sel mikroba membentuk flok yang akan mengendap di tangki pengendap.



Sumber: Departemen Kesehatan RI, 2009

Gambar 5. Skematik Proses Pengolahan Air Limbah dengan Proses Aerobik Lumpur Aktif

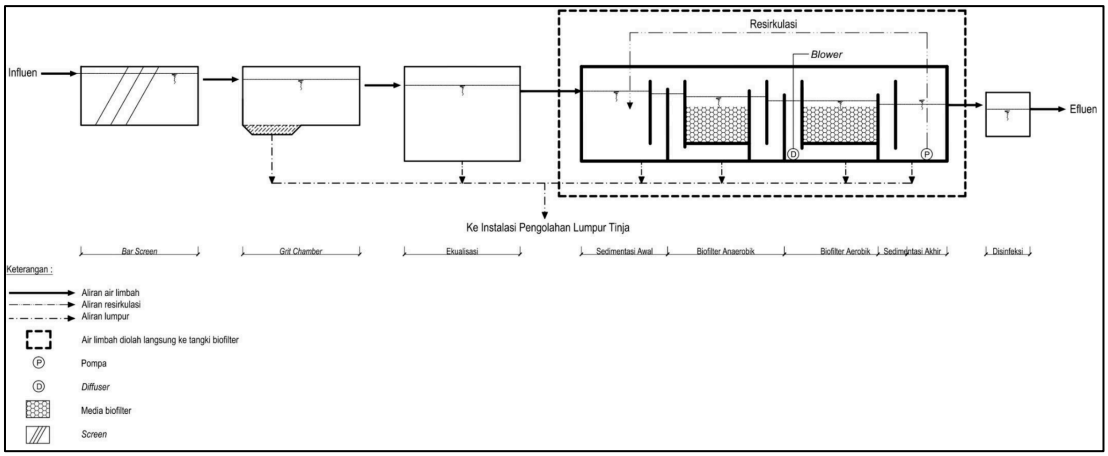
Lebih lanjut pengelolaan air limbah rumah sakit juga diatur dalam Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 40 Tahun 2022 tentang Persyaratan Teknis Bangunan, Prasarana, dan Peralatan Kesehatan Rumah Sakit. Dalam regulasi tersebut, direkomendasikan agar:

a) Pada sumber instalasi gedung dilakukan pipa pemisah antara air limbah yang sifatnya *greywater* dan *blackwater*.
b) Air limbah dari toilet, laundry, aktivitas kantor dan ruangan lainnya dialirkan menuju *septic tank* terlebih dahulu sebagai *pre-treatment* untuk pengendapan lumpur, kemudian airnya dialirkan ke IPAL.
c) Selanjutnya air limbah dari dapur dilakukan pemisahan melalui (*grease trap*) terlebih dahulu sebelum disalurkan menuju IPAL.

d) Proses ini bertujuan untuk mengurangi beban air limbah dan lumpur yang masuk ke IPAL termasuk, mengurangi timbulan bau, serta mengurangi kebutuhan air untuk penggelontoran saluran.

Mempertimbangkan rekomendasi dari Petunjuk Teknis Kementerian Kesehatan dan regulasi di Indonesia yang membedakan pengolahan air limbah B3 termasuk yang bersifat infeksius, maka peneliti menarik kesimpulan bahwa pada prinsipnya pengelolaan air limbah rumah sakit sebagian besar sejenis dengan air limbah domestik. Namun demikian diperlukan *pre-treatment* atau pengolahan awal terhadap sumber-sumber yang spesifik seperti dapur, laboratorium, dan unit lainnya sebelum mengalirkan *overflow* air limbahnya menuju IPAL.

Memperhatikan hal tersebut, maka teknologi IPAL juga dapat menggunakan teknologi yang sejenis dengan pengolahan air limbah domestik, dimana terdapat Standar Nasional Indonesia (SNI) 9294:2024 – Tata Cara Perencanaan dan Pemasangan Instalasi Pengolahan Air Limbah Domestik dengan Tangki Biofilter, dengan proses diagram pengolahan yang ditampilkan pada Gambar 6. berikut.



Sumber: SNI 9294:2024

Gambar 6. Diagram Alir Proses Pengolahan Air Limbah dengan Biofilter

Proses pengolahan air limbah dengan biofilter tersebut dapat memenuhi standar BOD < 30 mg/L, COD <100 mg/L, TSS < 30 mg/L, Amonia < 10 mg/L, dan Total Coliform < 3.000 jmlah/100 mL. Jika terdapat persyaratan baku mutu yang lebih ketat, maka dapat dilakukan penyesuaian teknologi yang lebih mutakhir. Adapun efisiensi penyisihan parameter air limbah dengan proses biofilter menurut SNI 9294:2024 dapat dilihat pada Tabel dibawah ini.

Tabel 9. Efisiensi Penyisihan Parameter Air Limbah dengan Biofilter *Anaerob Aerob*

Parameter	Efisiensi Penyisihan (%)				
	Sedimentasi Awal	**Biofilter Anaerobik**	**Biofilter Aerobik**	**Biofilter Anaerobik-Aerobik**	**Sedimentasi Akhir**
pH	-	-	-	-	-
BOD	20-30	60-75	70-90	80-95	20-30
COD	20-30	60-75	70-90	80-95	20-30
TSS	50-70	20-30	20-30	20-30	50-70
Amonia (NH3-N)	5-10	10-40	40-80	70-90	5-10
Minyak & Lemak*	-	-	-	-	-
Total Koliform**	-	-	-	-	-

Sumber: RSNI 9294:2024

Keterangan:

*) Penyisihan lemak harus menggunakan pengolahan pendahuluan atau *grease trap*

**) Penyisihan total koliform harus menggunakan unit disinfeksi

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan data sekunder hasil pengujian kualitas air limbah baik pada titik *inlet* maupun *outlet* dalam 1 (satu) tahun terkahir, kemudian dilakukan verifikasi dengan melakukan uji sampel air limbah pada beberapa lokasi rumah sakit berdasarkan kelas rumah sakit.

3.1.1 Metode Pengumpulan Data

Populasi sampel pada data sekunder tidak dibatasi jumlah sampel, hal tersebut menyesuaikan dengan ketersediaan data pada laboratorium penguji. Pada sampel verifikasi diperlukan minimal 4 (empat) lokasi rumah sakit yang mewakili masing-masing kelas rumah sakit.

3.1.2 Jenis dan Jumlah Data

Populasi sampel pada data sekunder tidak dibatasi jumlah sampel, hal tersebut menyesuaikan dengan ketersediaan data pada laboratorium penguji. Pada sampel verifikasi diperlukan minimal 4 (empat) lokasi rumah sakit yang mewakili masing-masing kelas rumah sakit.

3.1.3 Waktu dan Lokasi

Data sekunder yang dikumpulkan dibatasi untuk pengujian rutin rumah sakit selama 1 (satu) tahun yaitu Tahun 2023, sedangkan verifikasi sampel uji dilakukan pada tahun 2024. Lokasi pengambilan sampel pada penelitian yaitu rumah sakit yang secara administratif berada di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta.

3.2. Uji Laboratrium

Pengujian contoh uji air limbah dilakukan pada salah satu laboratorium terakreditasi yang berlokasi di Provinsi Daerah Isitimewa Yogyakarta. Adapun metode pengujian laboratorium untuk masing-masing parameter uji ditampilkan pada Tabel 10. berikut.

Tabel 10. Metode Uji Laboratorium

No.	Parameter	Satuan	Metode Uji
1.	Suhu	^{0}C	SNI-06-6989.23 tahun 2005
2.	TSS	mg/L	SNI 6989.3 tahun 2019
3.	TDS	mg/L	SNI 6989.27 tahun 2019
4.	pH	-	SNI 6989.11 tahun 2019
5.	BOD	mg/L	SNI 6989.72 tahun 2009
6.	COD	mg/L	SNI 6989.2 tahun 2019
7.	Deterjen (MBAS)	mg/L	SNI 06-6989.51 tahun 2005
8.	*Phenol*	mg/L	SNI 06-6989.21 tahun 2004
9.	Minyak & Lemak	mg/L	SNI 6989.10 tahun 2011
10.	Amoniak (NH_3-N)	mg/L	SNI 06-9308-2 tahun 2012
11.	*Total Coliform*	MPN/100 ml	ISO 9308-2 tahun 2012

3.3. Prosedur Analisis Data

Prosedur analisis data dalam penelitian tinjauan kecenderungan kualitas air limbah rumah sakit ini meliputi analisis tabulasi silang, analisis varian, dan analisis efisiensi removal yang diuraikan sebagai berikut.

3.3.1 Analisis Deksriptif

Pada tahap ini data yang telah dikumpulkan, diperiksa, kemudian disusun untuk dianalisis menggunakan metode analisis deskriptif, dimana data yang tersusun dianalisis untuk mendapatkan pola dan karakteristik kualitas air limbah dari berbagai kelas rumah sakit. Analisis deskriptif dipiliha karena dapat melibatkan berbagai ukuran kecenderungan sentral (mean, median, model) dan ukuran dispersi (rentang, varian, standar deviasi) dalam merangkum data (Abubaker, 2024), sehingga memudahkan penelitian memahami data secara lebih jelas yang dapat merumuskan hipotesis dan melakukan pengambilan keputusan (Jukowska, 2024). Penggunaan Excel untuk analisis deskriptif dasar merupakan pendekatan praktis yang dapat merangkum berbagai data seperti *mean*, *median*, *mode*, *range*, *variance* dan *standard deviation* (Patel, 2021). Perangkat lunak Excel digunakan untuk membuat berbagai tipe bagan termasuk histogram, diagram batang dan lingkaran sehingga dapat merepresentasikan distribusi dan hubungan data secara visual (Sallis et al., 2021). Analisis

deskriptif menggunakan perangkat lunak *Excel* dapat menganalisis dan mengevaluasi kualitas air limbah, sehingga memudahkan dalam proses pengambilan keputusan terkait proses pemantauan dan pengolahan air limbah (Sharma et al., 2021).

3.3.2 Pemilihan Opsi Teknologi

Pemilihan opsi teknologi IPAL harus berdasarkan data karakteristik air limbah, sehingga dapat meningkatkan ketepatan pemilihan teknologi dengan mengelompokkan berbagai parameter air limbah dengan proses pengolahan yang optimal (Xu et al., 2021). Perhitungan efisiensi removal dilakukan untuk mengetahui tingkat penyisihan parameter air limbah rumah sakit dengan opsi pemilihan teknologi IPAL berdasarkan karakteristik air limbah. Efisiensi removal ini kemudian dibandingkatn dengan standar efisiensi penyisihan parameter pada setiap unit proses/unit operasi ipal yang digunakan. Perhitungan efisiensi removal tersebut menjadi dasar dalam melakukan pemilihan opsi teknologi baik pengolahan fisika, kimia, dan biologi. Selain karakteristik air limbah, diperlukan juga kriteria lain seperti waktu retensi hidrolik dan jumlah populasi yang setara secara signifikan dalam mempengaruhi efisiensi removal (Fernández et al., 2021).

3.3.3 Interpretasi Hasil Penelitian

Setelah mengetahui pola dan karakteristik data, variasi dan signifikansi data, serta efektivitas pengolahan air limbah, maka data-data tersebut kemudian diinterpretasikan untuk menggambarkan tingkat kecenderungan, pola, karakteristik, varian, siginifikansinya, serta alternatif pengolahan air limbah rumah sakit yang tepat untuk menyisihkan parameter-parameter air limbah yang dikaji.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengumpulan Data Karakteristik Kualitas Air Limbah RS

Pengumpulan data sekunder berupa kualitas air limbah rumah sakit bekerja sama dengan salah satu laboratorium lingkungan yang terakreditasi oleh Komite Akreditasi Nasional (KAN) dan Teregsitrasi sebagai Laboratorium Lingkungan di Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. Adanya kerja sama tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa kualitas data meliputi proses metode pengambilan contoh uji sampel dan analisis laboratorium telah dilakukan sesuai dengan prosedur dan standar yang berlaku di Indonesia. Identitas laboratorium lingkungan dan rumah sakit tidak disebutkan secara spesifik untuk menjaga kerahasiaan data dan memastikan bahwa hasil penelitan hanya digunakan untuk kepentingan ilmiah sesuai dengan prinsip etika penelitian.

Dalam penelitian ini, data yang dikumpulkan meliputi 4 (empat) unit Rumah Sakit yang mewakili setiap kelas rumah sakit yaitu Kelas A, B, C, dan D yang berlokasi di Daerah Istimiwa Yogyakarta. Pemilihan tersebut guna memberikan gambaran terkait karakteristik air limbah berdasarkan tipe kelas rumah sakit yang berlaku di Indonesia. Data kualitas air limbah meliputi inlet dan outlet IPAL dari 4 (empat) rumah sakit dengan frekuensi pemantauan 3 (tiga) triwulan pada Tahun 2024. Data hasil uji yang berhasil dikumpulan sebanyak 22 (dua puluh dua) sampel meliputi 11 (sebelas) sampel hasil uji *inlet* IPAL dan 11 (sebelas) sampel hasil uji *outlet* IPAL. Adapun parameter uji yang didapatkan dan difokuskan menjadi bahan evaluasi dalam penelitian ini meliputi parameter TSS, pH, BOD, COD, MBAS, Fenol, Minyak dan Lemak, Amoniak, dan Bakteri *Coliform*. Adapun rincian sampel hasil uji yang telah dikumpulkan pada setiap rumah sakit diuraikan sebagai berikut.

1. Rumah Sakit X (Tipe A)
   - *Inlet* : 3 (tiga) sampel hasil uji laboratorium selama 3 (tiga) triwulan terakhir
   - *Outlet* : 3 (tiga) sampel hasil uji laboratorium selama 3 (tiga) triwulan terakhir
2. Rumah Sakit X (Tipe B)
   - *Inlet* : 3 (tiga) sampel hasil uji laboratorium selama 3 (tiga) triwulan terakhir
   - *Outlet* : 3 (tiga) sampel hasil uji laboratorium selama 3 (tiga) triwulan terakhir
3. Rumah Sakit X (Tipe C)
   - *Inlet* : 2 (dua) sampel hasil uji laboratorium selama 2 (dua) triwulan terakhir
   - *Outlet* : 2 (dua) sampel hasil uji laboratorium selama 2 (dua) triwulan terakhir

4. Rumah Sakit X (Tipe D)
   - *Inlet* : 3 (tiga) sampel hasil uji laboratorium selama 3 (tiga) triwulan terakhir
   - *Outlet* : 3 (tiga) sampel hasil uji laboratorium selama 3 (tiga) triwulan terakhir

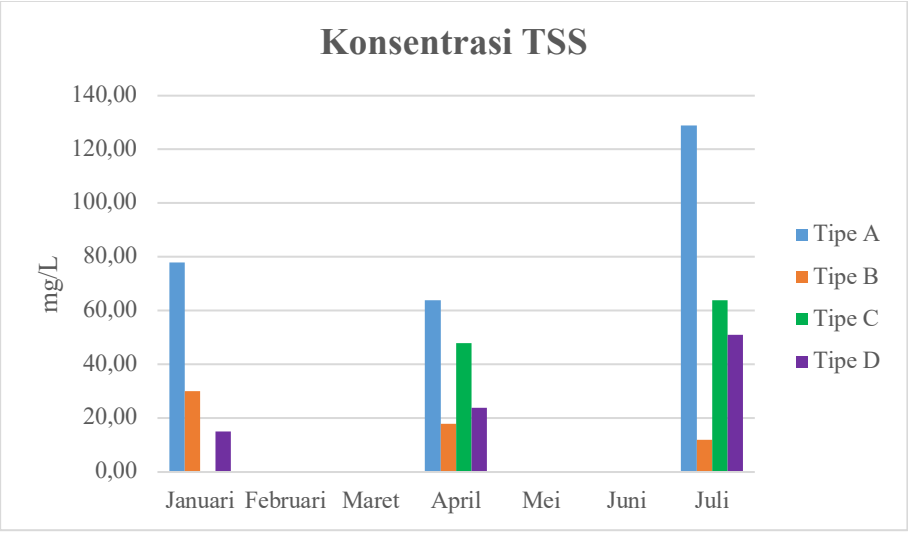
Data-data yang telah dikumpulkan akan digunakan sebagai dasar dalam melakukan analisis dan pengolahan data, analisis karakteristik, kepatuhannya terhadap baku mutu, serta menjadi bahan evaluasi dalam alternatif pemilihan teknologi pengolahan air limbah rumah sakit.

4.2. Analisa Karakteristik Air Limbah Rumah Sakit (Inlet IPAL)

Berdasarkan data hasil uji karakteristik air limbah rumah sakit yang telah dikumpulkan, maka dapat dilakukan analisa karakteristik (*inlet* IPAL) berdasarkan parameter kualitas air limbah rumah sakit diuraikan sebagai berikut.

4.2.1 TSS

Total padatan tersuspensi (TSS) dapat berasal dari aktivitas medis seperti sisa jaringan dan reagen pasien, aktivitas linen atau *laundry* yang mengandung residu deterjen, serat kain dan partikel lainnya, aktivitas dapur atau kantin seperti sisa makanan, minyak dan lemak yang dapat membentuk partikel tersuspensi, serta aktivitas pembersihan seperti lantai, dinding, dan peralatan lainnya yang memiliki partikel debu. Hasil analisis karakteristik parameter TSS disajikan pada Gambar 7. berikut.

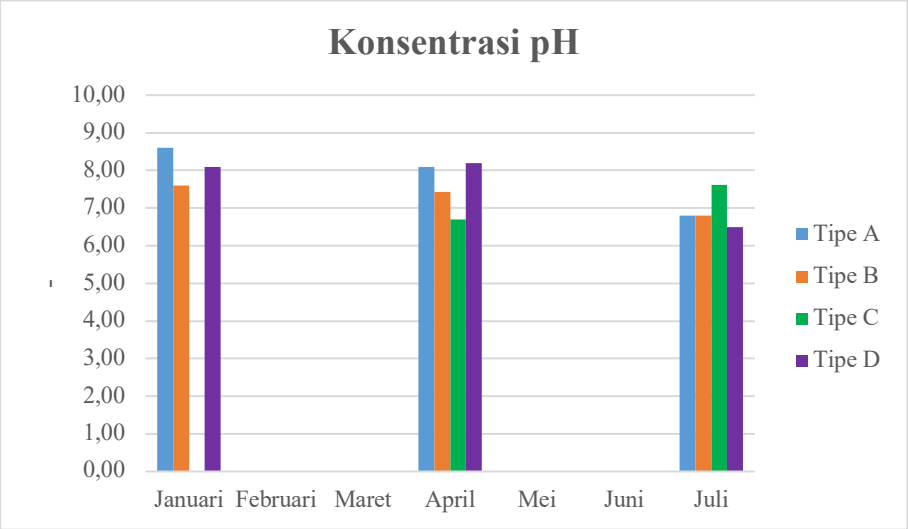


Gambar 7. Karakteristik *Inlet* Parameter TSS

Berdasarkan grafik diatas, hasil uji parameter TSS meliputi rumah sakit tipe A sebesar 64 - 129 mg/L; tipe B yaitu 12 - 30 mg/L; tipe C 48 - 64 mg/L; dan tipe D 15 - 51 mg/L. Jika dibandingkan dengan Tabel 5. dan Tabel 6., konsentrasi parameter TSS masih termasuk dalam rentang hasil penelitian-penelitan sebelumnya, namun cenderung lebih kecil. Kadar TSS tertinggi terjadi pada rumah sakit kelas A sebesar 129,0 mg/L, yang mengindisikan fasilitas kesehatan dan pendukung yang lebih kompleks dan jumlah kapasitas maupun kunjungan yang lebih banyak dibanding kelas lainnya. Kadar TSS pada tipe B, C, dan D tidak menujukkan pola tertentu dikarenakan variasi operasional yang fluktuatif setiap harinya.

4.2.2 pH

Parameter pH dapat dipengaruhi oleh sisa konsumsi obat-obatan, larutan infus, bahan kimia, deterjen pembersih maupun dari sisa makanan. Adapun hasil analisis karakteristik parameter pH disajikan pada Gambar 8. berikut.



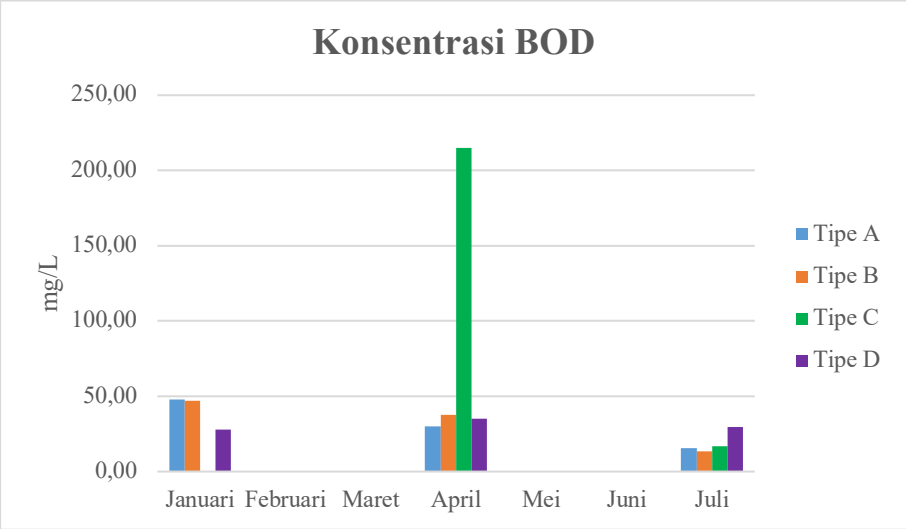
Gambar 8. Karakteristik *Inlet* Parameter pH

Berdasarkan grafik diatas menunjukkan semua kelas rumah sakit memiliki rentang nilai yang seragam. Jika dibandingkan dengan Tabel 5. dan Tabel 6., konsentrasi parameter pH cenderung sama, hal ini mengindikasikan bahwa pH pada air limbah rumah sakit berada pada kondisi yang stabil. Jika ditelaah lebih lanjut, regulasi di Indonesia melarang pengolahan air limbah yang bersifat kimia dan infeksius, dimana pengelolaanya termasuk dalam kategori limbah bahan berbahaya dan beracun (B3), sehingga air limbah

yang masuk di IPAL lebih dominan adalah air limbah domestik, hal ini menjadi salah satu indikasi kadar pH masih dalam kondisi yang stabil.

4.2.3 BOD

Konsentrasi *Biological Oxygen Demand* (BOD) yang tinggi menunjukkan banyaknya bahan organik yang dapat terdegradasi oleh mikroorganisme, sehingga dapat mempengaruhi beban pengolahan air limbah. Dalam aktivitas rumah sakit, kadar BOD dapat berasal dari aktivitas domestik yang menghasilkan tinja, urin, sisa makanan, cucian liner, dapur. Adapun hasil analisis karakteristik parameter BOD disajikan pada Gambar 9. berikut.



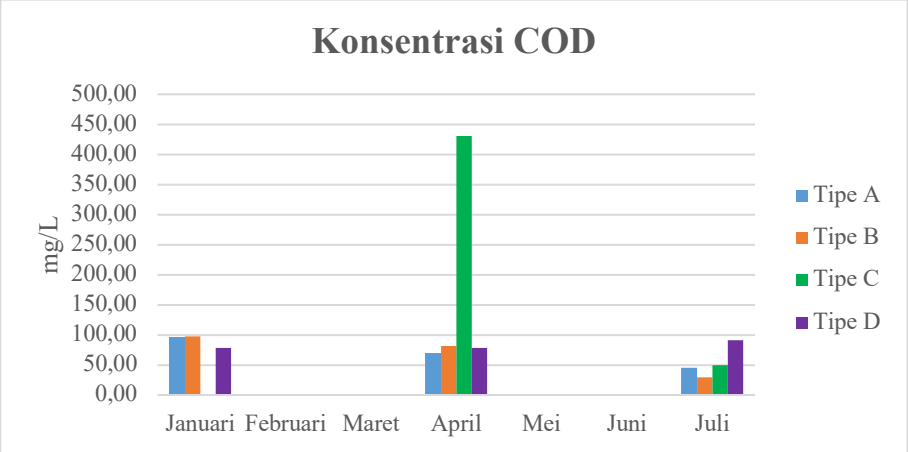
Gambar 9. Karakteristik *Inlet* Parameter BOD

Berdasarkan grafik diatas, hasil uji parameter BOD meliputi rumah sakit tipe A sebesar 15,6 - 48 mg/L; tipe B yaitu 13,5 – 47,2 mg/L; tipe C 17 - 215 mg/L; dan tipe D 28 - 35 mg/L. Kadar BOD tertinggi terjadi pada Rumah Sakit Kelas C sebesar 215 mg/L. Tingginya konsentrasi BOD pada rumah sakit tipe C dapat dikaitkan dengan pola operasional yang lebih intensif, mengingat rumah sakit ini melayani kelompok masyarakat menengah ke bawah dengan kapasitas yang lebih besar dibandingkan tipe D. Namun, dibandingkan dengan tipe A dan B, rumah sakit tipe C memiliki fasilitas yang lebih terbatas, termasuk dalam sistem pengelolaan air limbahnya. Keterbatasan dalam pemisahan dan pengolahan limbah dapat menyebabkan tingginya kandungan bahan organik dalam air limbah, yang berkontribusi terhadap peningkatan kadar BOD. Jika

dibandingkan dengan Tabel 5. dan Tabel 6., konsentrasi parameter BOD masih termasuk dalam rentang hasil penelitian-penelitan sebelumnya, namun cenderung lebih kecil.

4.2.4 COD

Jika konsentrasi BOD menggambarkan jumlah oksigen yang dikonsumsi oleh mikroorganisme dalam mendekomposisi bahan organic yang mudah terurai, konsentrasi *Chemical Oxygen Demand* (COD) mencakup semua bahan organic, baik yang dapat terdegradasi secara biologis maupun yang sulit terurai. Sehingga sumber kadar COD pada prinsipnya sama dengan BOD yang dapat berasal dari aktivitas domestik yang menghasilkan tinja, urin, sisa makanan, cucian liner, dapur. Adapun hasil analisis karakteristik parameter COD disajikan pada Gambar 10. berikut.



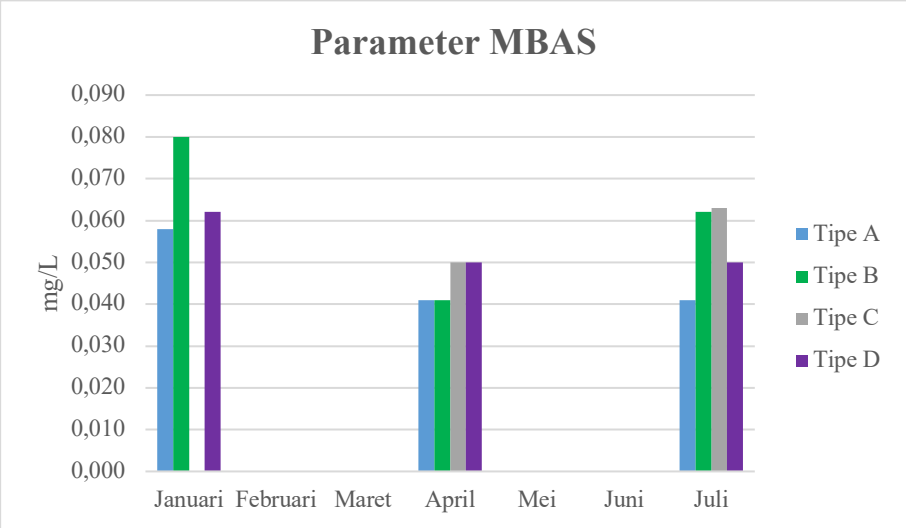
Gambar 10. Karakteristik *Inlet* Parameter COD

Berdasarkan grafik diatas, hasil uji parameter COD meliputi rumah sakit tipe A sebesar 45,6 ± 96,1 mg/L; tipe B yaitu 29,8 – 97,8 mg/L; tipe C 49,7 – 431,0 mg/L; dan tipe D 78,4 – 90,6 mg/L. Kadar COD tertinggi terjadi pada Rumah Sakit Kelas C sebesar 413 mg/L. Alasan tingginya konsentrasi COD pada rumah sakit tipe C sama dengan penjelasan pada konsetrasi BOD sebelumnya, dimana rumah sakit ini melayani kelompok masyarakat menengah ke bawah dengan kapasitas yang lebih besar dibandingkan tipe D. Namun, dibandingkan dengan tipe A dan B, rumah sakit tipe C memiliki fasilitas yang lebih terbatas, termasuk dalam sistem pengelolaan air limbahnya. Keterbatasan dalam pemisahan dan pengolahan limbah dapat menyebabkan tingginya kandungan bahan organik dalam air limbah, yang berkontribusi terhadap peningkatan kadar COD. Jika dibandingkan dengan Tabel 5. dan Tabel 6., konsentrasi parameter COD

masih termasuk dalam rentang hasil penelitian-penelitan sebelumnya, namun cenderung lebih kecil.

4.2.5 MBAS

Methylene Blue Active Substances (MBAS) menggambarkan kadar surfaktan anionik dalam air limbah seperti deterjen dan bahan pembersih lainnya. Sehingga dalam aktivitas air limbah rumah sakit parameter ini berasal dari semua kegiatan pembersihan peralatan, lantai, dapur, dan aktivitas pencucian lainnya yang menggunakan deterjen dan/atau bahan sejenis. Adapun hasil analisis karakteristik parameter MBAS disajikan pada Gambar 11. berikut.

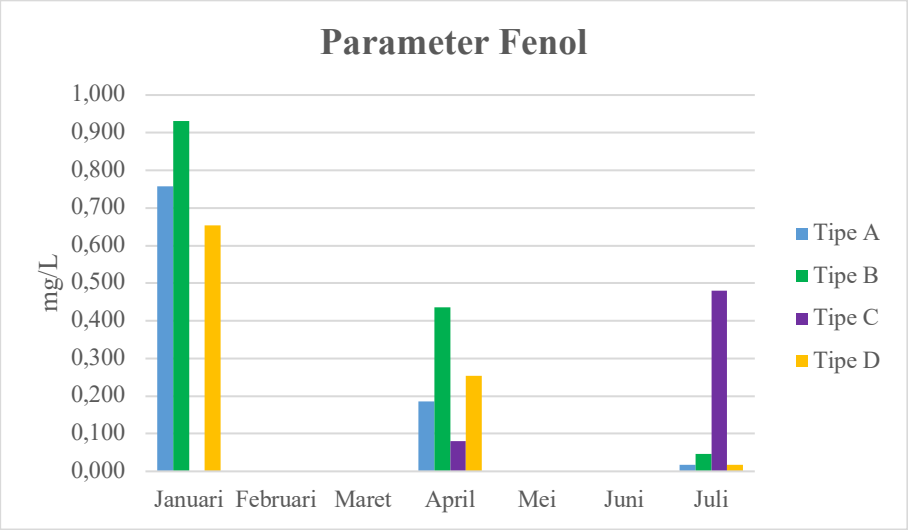


Gambar 11. Karakteristik *Inlet* Parameter MBAS

Berdasarkan grafik diatas, hasil uji parameter MBAS meliputi rumah sakit tipe A sebesar 0,041 – 0,058 mg/L; tipe B yaitu 0,041- 0,08 mg/L; tipe C 0,05 – 0,063 mg/L; dan tipe D 0,05 – 0,062 mg/L. Jika dibandingkan dengan Tabel 5. dan Tabel 6., konsentrasi parameter MBAS lebih kecil dibandingkan hasil penelitian-penelitan sebelumnya. Konsentrasi MBAS pada semua kelas rumah sakit cenderung rendah, hal ini dapat diindikasikan dengan adanya penggunaan *Pre-Treatment* berupa *Oil & Grease* yang menjadi pengolahan umum pada berbagai kegiatan rumah sakit di Indonesia. Penggunaan *oil & grease* tersebut menjadikan kadar surfaktan dapat berikatan dengan minyak dan lemak sehingga mengurangi konsentasi MBAS yang masuk ke *Inlet* IPAL.

4.2.6 Fenol

Sumber utama fenol dalam air limbah dapat berasal dari limbah farmasi, laboratorium, dan ruang tindakan seperti ICU, radiologi, pencucian film (ruang radiologi), serta feses dan urin dari pasien yang mengonsumsi obat-obatan tertentu seperti antiobiotik. Adapun hasil analisis karakteristik parameter Fenol disajikan pada Gambar 12. berikut.

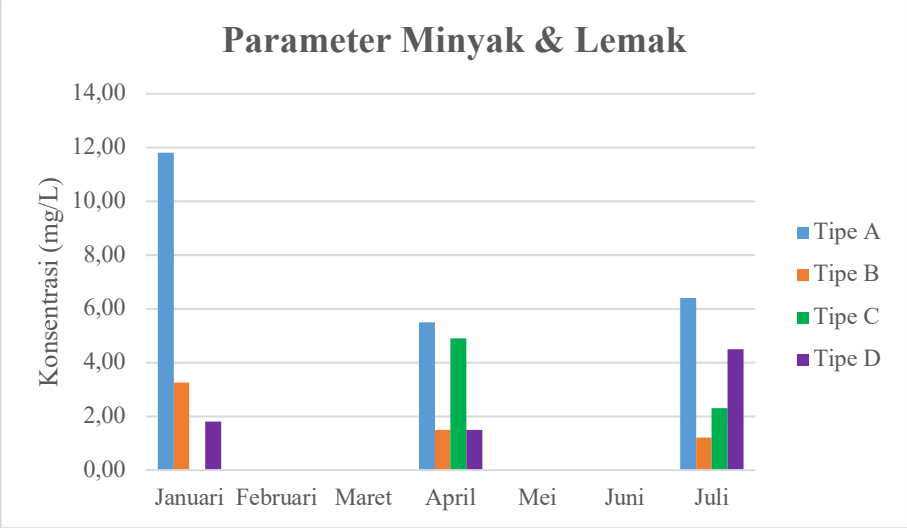


Gambar 12. Karakteristik Inlet Parameter Fenol

Berdasarkan grafik diatas, hasil uji parameter Fenol meliputi rumah sakit tipe A sebesar 0,018 – 0,757 mg/L; tipe B yaitu 0,0436 – 0,931 mg/L; tipe C 0,048 – 0,08 mg/L; dan tipe D 0,018 – 0,653 mg/L. Jika dibandingkan dengan Tabel 6., konsentrasi parameter Fenol berada pada rentang rata-rata. Konsentrasi fenol pada kelas rumah sakit cenderung rendah, dimana sumber utama fenol dari bahan-bahan kimia dan farmasi tidak masuk dalam IPAL, mengingat regulasi di Indonesia yang mengatur terkait limbah bahan berbahaya dan beracun dikelola dengan prosedur yang berbeda. Namun demikian, kadar fenol diindikasikan berasal dari feses dan urin pasien yang mengonsumsi antibiotik dan residu antiseptik yang tetap perlu diolah dalam IPAL.

4.2.7 Minyak dan Lemak

Sumber utama minyak dan lemak dalam air limbah rumah sakit dapat dipastikan berasal dari aktivitas dapur gizi bagi pasien, sisa makanan serta adanya residu penggunaan obat-obatan yang berbasis minyak. Adapun hasil analisis karakteristik parameter Minyak dan Lemak disajikan pada Gambar 13. berikut.

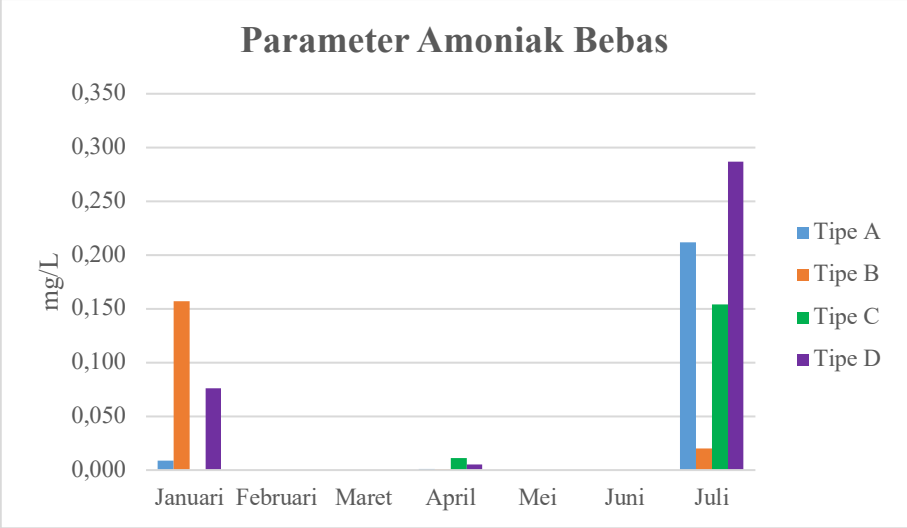


Gambar 13. Karakteristik Inlet Parameter Minyak dan Lemak

Berdasarkan grafik diatas, hasil uji parameter Minyak dan Lemak meliputi rumah sakit tipe A sebesar 5,5 – 11,8 mg/L; tipe B yaitu 1,2 – 3,25 mg/L; tipe C 2,3 – 4,9 mg/L; dan tipe D 1,5 – 4,5 mg/L. Jika dibandingkan dengan Tabel 5. dan Tabel 6., konsentrasi parameter Minyak & Lemak masih berada pada rentang penelitian-penelitan sebelumnya. Konsentrasi Minyak dan Lemak pada semua kelas rumah sakit cenderung rendah, hubungannya dengan konsentrasi MBAS juga rendah, mengindikasikan adanya *Oil & Grease* yang menjadi pengolahan umum pada berbagai kegiatan rumah sakit di Indonesia. Penggunaan *oil & grease* sebagai *Pre-Treatment* menjadikan kadar minyak dan lemak diolah terlebih dahulu seblum masuk ke Inlet IPAL.

4.2.8 Amoniak Bebas

Sumber utama amoniak dapat berasal dari feses dan urin semua penghuni dan pengunjung rumah sakit, termasuk juga penggunaan bahan-bahan medis dan pembersih berbasis amoniak. Adapun hasil analisis karakteristik parameter Amoniak disajikan pada Gambar 14. berikut.

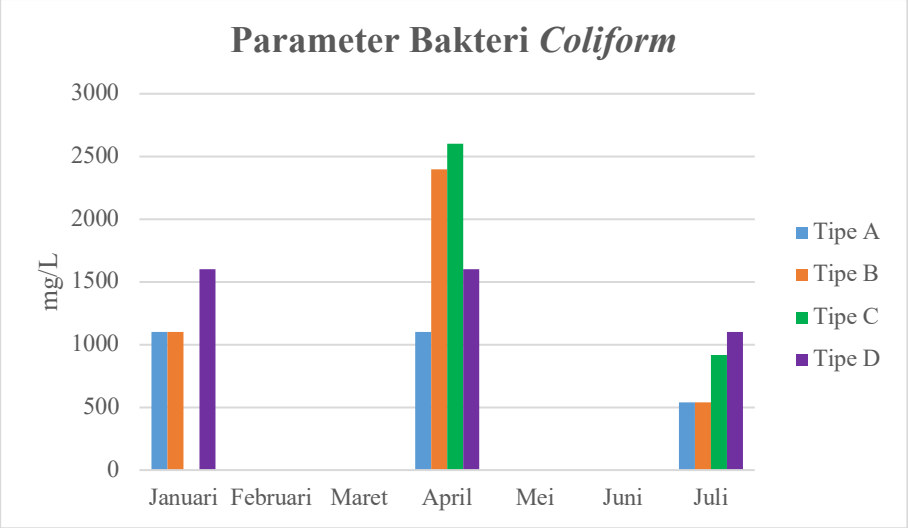


Gambar 14. Karakteristik *Inlet* Parameter Amoniak Bebas

Berdasarkan grafik diatas, hasil uji parameter Amoniak meliputi rumah sakit tipe A sebesar 0,009 – 0,212 mg/L; tipe B yaitu 0,0002 – 0,157 mg/L; tipe C 0,011 – 0,154 mg/L; dan tipe D 0,005 – 0,287 mg/L. Jika dibandingkan dengan Tabel 5. dan Tabel 6., konsentrasi parameter Amoniak lebih kecil dibandingkan hasil penelitian-penelitan sebelumnya. Konsentrasi Amoniak pada semua kelas rumah sakit cenderung rendah, hal mengindikasikan adanya penggunaan *Pre-Treatment* berupa Tangki Septik Konvensional maupun Biofilter yang menjadi pengolahan umum di Indonesia sebelum disalurkan ke unit IPAL.

4.2.9 Bakteri *Coliform*

Coliform merupakan kelompok bakteri yang hidup di lingkungan dan saluran pencernaan manusia yang keluar melalui feses dan urin. Sumber utama bakteri *coliform* tentunya dari aktivitas domestik seperti toilet serta cucian lainnya yang terkontaminasi. Adapun hasil analisis karakteristik parameter Amoniak disajikan pada Gambar 15. berikut.

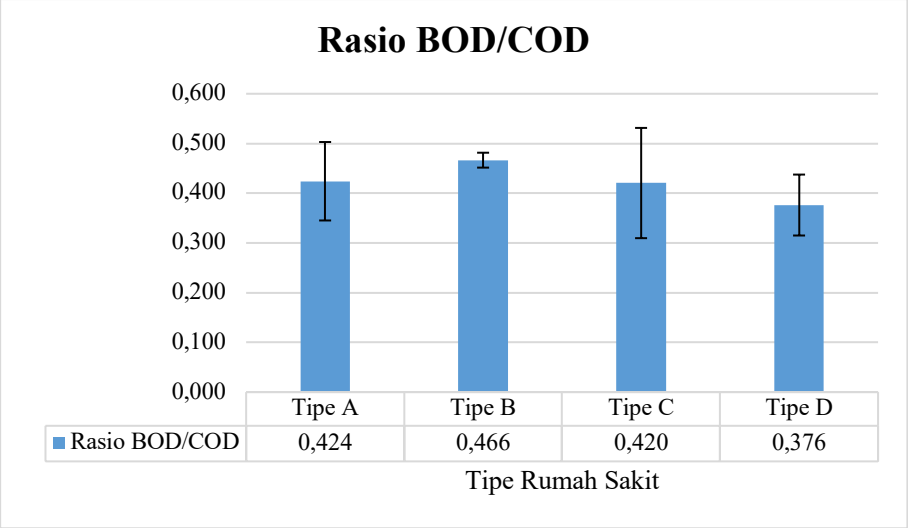


Gambar 15. Karakteristik *Inlet* Parameter Bakteri Coliform

Berdasarkan grafik diatas, hasil uji parameter Bakteri Coliform meliputi rumah sakit tipe A sebesar 540 - 1100 MPN/100 mL; tipe B yaitu 540 - 2400 MPN/100 mL; tipe C 920 – 2600 MPN/100 mL; dan tipe D 1100 - 1600 MPN/100 mL. Jika dibandingkan dengan Tabel 4. dan Tabel 5., konsentrasi parameter Bakteri *Coliform* masih termasuk dalam rentang hasil penelitian-penelitan sebelumnya, namun cenderung lebih kecil. Konsentrasi Bakteri *Coliform* pada semua kelas rumah sakit cenderung rendah, hal mengindikasikan adanya penggunaan *Pre-Treatment* berupa Tangki Septik Konvensional maupun Biofilter yang menjadi pengolahan umum pada berbagai kegiatan rumah sakit di Indonesia.

4.2.10 Rasio BOD/COD

Rasio BOD/COD merupakan indikator seberapa besar bagian dari total kabron organik yang dapat terdegrasi secara biologis oleh mikroorganisme. Rasio Rumah Sakit Tipe A berkisar antara 0,342 – 0,50; Rumah Sakit Tipe B berkisar antara 0,45 – 0,48; Rumah Sakit Tipe C berkisar antara 0,34 – 0,5; dan Rumah Sakit Tipe D berkisar antara 0,33 – 0,44. Adapun hasil analisis karakteristik Rasio BOD/COD disajikan pada Gambar 16. berikut.



Gambar 16. Karakteristik Rasio BOD/COD pada *Inlet* IPAL

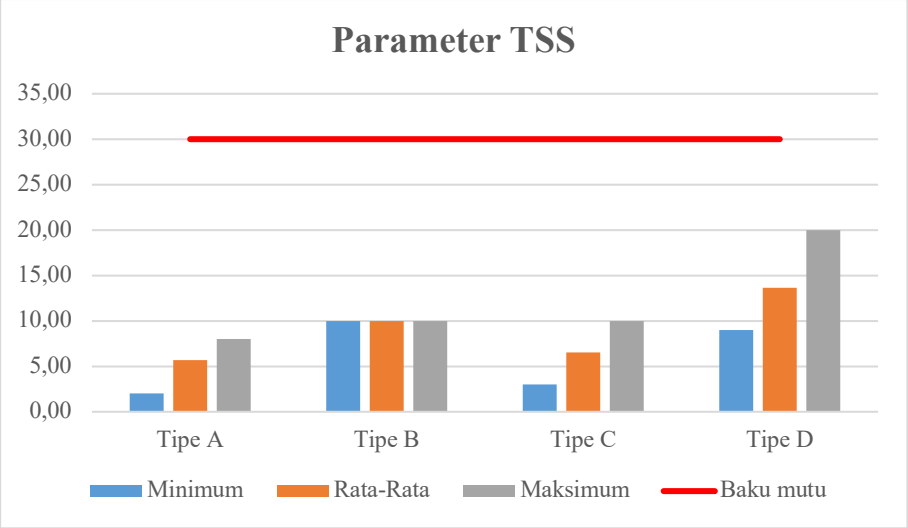
Berdasarkan grafik diatas, menunjukkan rasio BOD/COD berkisar antara 0,3 – 0,5 dimana hasil ini sesuai dengan Tabel 7. Faktor BOD/COD dalam Air Limbah, bahwa rasio BOD/COD dalam rentang 0,3 – 0,6 umumnya berada pada kondisi yang moderat dan sebagian besar bahan organiknya dapat diolah secara biologis. Lebih lanjut, terdapat kemungkinan senyawa-senyawa tertentu yang sulit terurai seperti obat-obatan dan bahan medis terkontaminasi lainnya, sehingga perlu diperhatikan kondisi biodegradabilitasnya.

4.3. Analisa Kualitas Air Limbah Olahan IPAL Rumah Sakit (*Outlet* IPAL)

Analisa karakteristik kualitas air limbah olahan IPAL Rumah Sakit dilakukan dengan membandingkan hasil uji *outlet* IPAL dengan gabungan kadar maksimum yang paling ketat antara Peraturan Daerah Istimewa Yogyakarta Nomor 7 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Limbah – Lampiran II Baku Mutu Air Limbah untuk Kegiatan Pelayanan Kesehatan dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.68/Menlhk-Setjen/2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik.

4.3.1. TSS

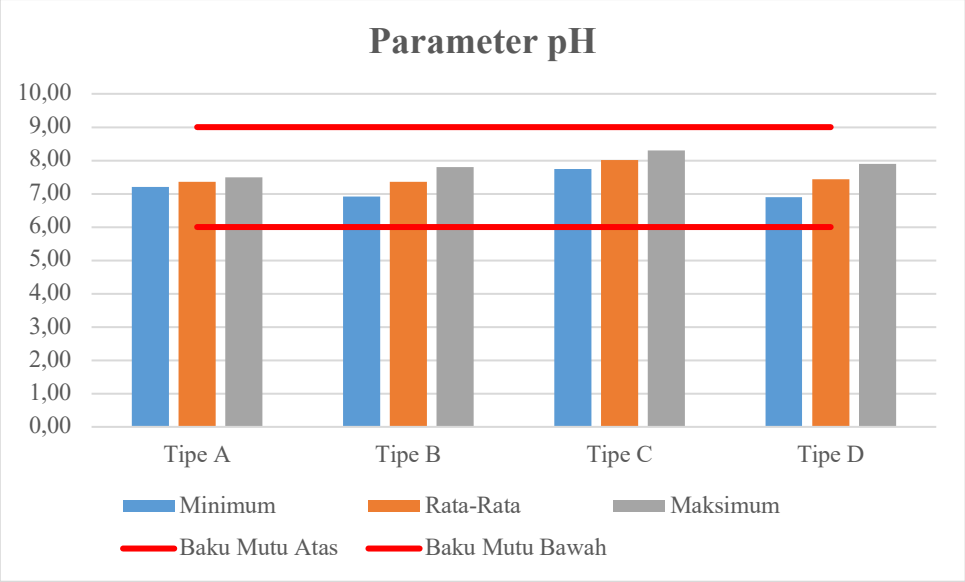
Hasil uji kualitas air limbah rumah sakit menunjukkan semua kelas rumah sakit memenuhi baku mutu parameter TSS yaitu 30 mg/L, dimana konsentrasi tertinggi pada rumah sakit tipe D yaitu 20,0 mg/L. Hasil uji kualitas *outlet* air limbah rumah sakit parameter TSS ditampilkan pada Gambar 17. berikut.



Gambar 17. Karakteristik *Outlet* Parameter TSS

4.3.2. pH

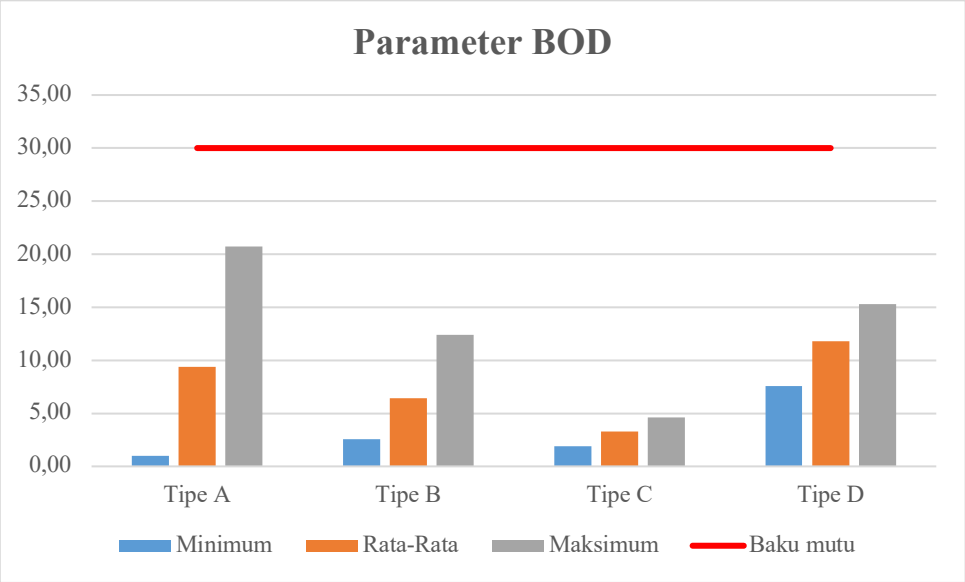
Hasil uji kualitas air limbah rumah sakit menunjukkan semua kelas rumah sakit memenuhi baku mutu parameter pH yaitu 6,0 – 9,0 dimana konsentrasu pH tertinggi terjadi pada Rumah Sakit Tipe C sebesar 8,30 dan terendah pada Rumah Sakit Tipe B sebesar 6,92. Hasil uji kualitas *outlet* air limbah rumah sakit parameter TSS ditampilkan pada Gambar 18. berikut.



Gambar 18. Karakteristik *Outlet* Parameter pH

4.3.3. BOD

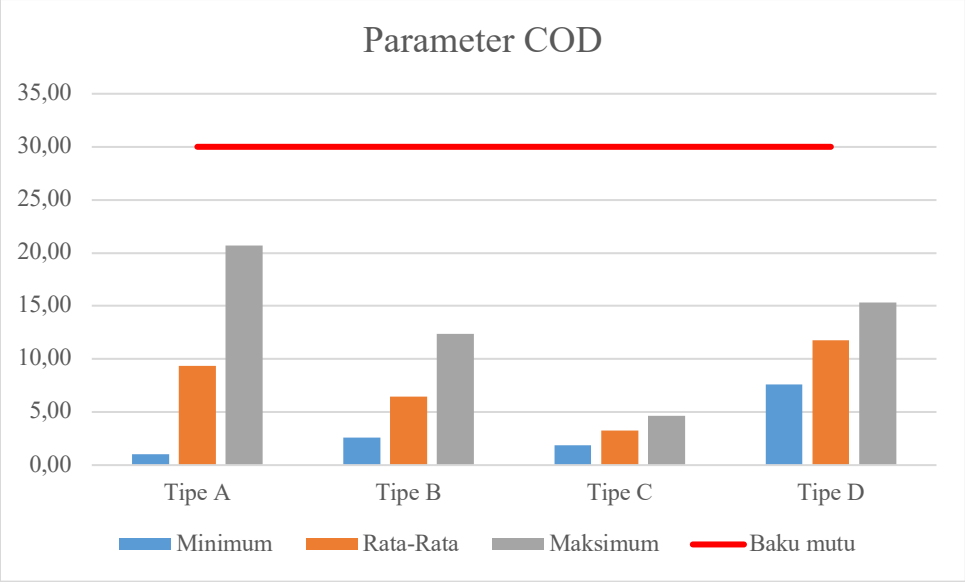
Hasil uji kualitas air limbah rumah sakit menunjukkan semua kelas rumah sakit memenuhi baku mutu parameter BOD yaitu 30 mg/L. Kadar BOD tertinggi terjadi pada Rumah Sakit Tipe A sebesar 20,7 mg/L. Hasil uji kualitas *outlet* air limbah rumah sakit parameter BOD ditampilkan pada Gambar 19. berikut.



Gambar 19. Karakteristik *Outlet* Parameter BOD

4.3.4. COD

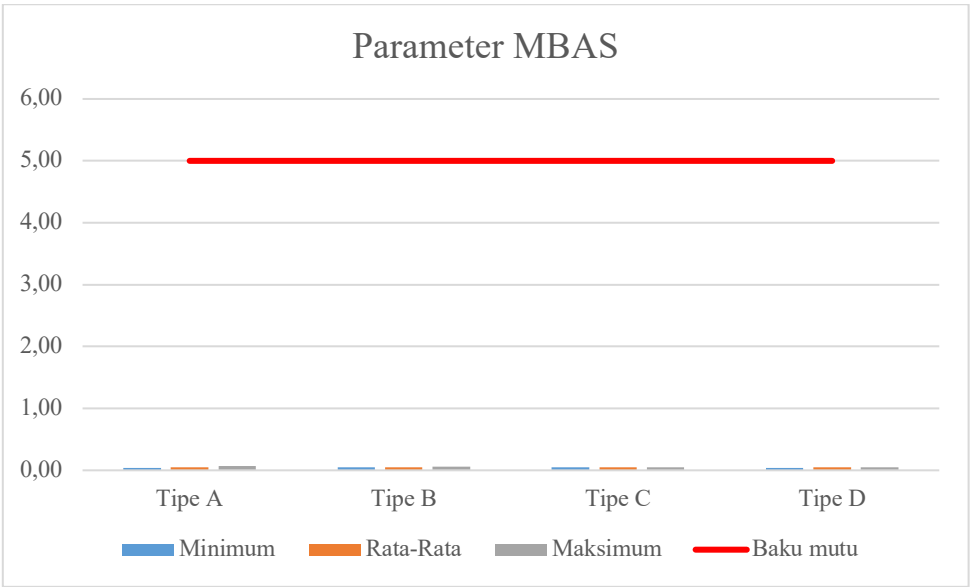
Hasil uji kualitas air limbah rumah sakit menunjukkan semua kelas rumah sakit memenuhi baku mutu parameter COD yaitu 80 mg/L. Konsentrasi COD tertinggi terjadi pada Rumah Sakit Tipe A sebesar 41,7 mg/L. Hasil uji kualitas *outlet* air limbah rumah sakit parameter COD ditampilkan pada Gambar 20. berikut.



Gambar 20. Karakteristik *Outlet* Parameter COD

4.3.5. MBAS

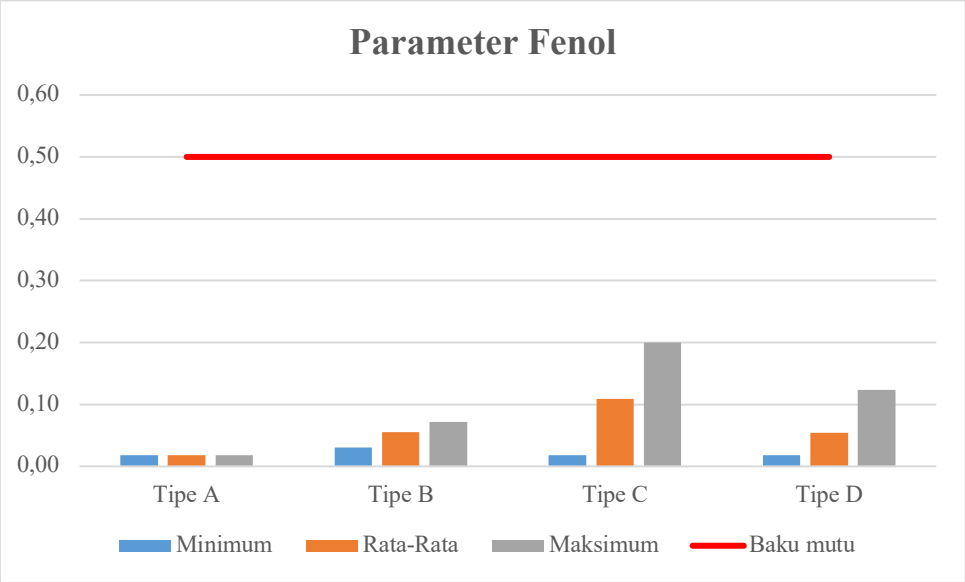
Hasil uji kualitas air limbah rumah sakit menunjukkan semua kelas rumah sakit memenuhi baku mutu parameter MBAS yaitu 5 mg/L. Konsentrasi MBAS tertinggi terjadi pada Rumah Sakit Tipe A sebesar 0,07 mg/L. Hasil uji kualitas *outlet* air limbah rumah sakit parameter MBAS ditampilkan pada Gambar 21. berikut.



Gambar 21. Karakteristik *Outlet* Parameter MBAS

4.3.6. Fenol

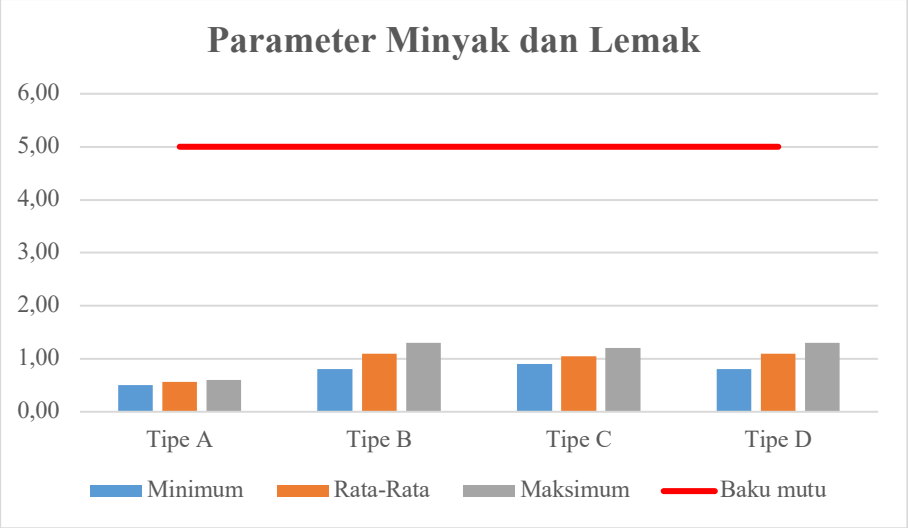
Hasil uji kualitas air limbah rumah sakit menunjukkan semua kelas rumah sakit memenuhi baku mutu parameter Fenol yaitu 0,5 mg/L. Konsentrasi fenol tertinggi terjadi pada Rumah Sakit Tipe C sebesar 0,20 mg/L. Hasil uji kualitas *outlet* air limbah rumah sakit parameter Fenol ditampilkan pada Gambar 22. berikut.



Gambar 22. Karakteristik *Outlet* Parameter Fenol

4.3.7. Minyak dan Lemak

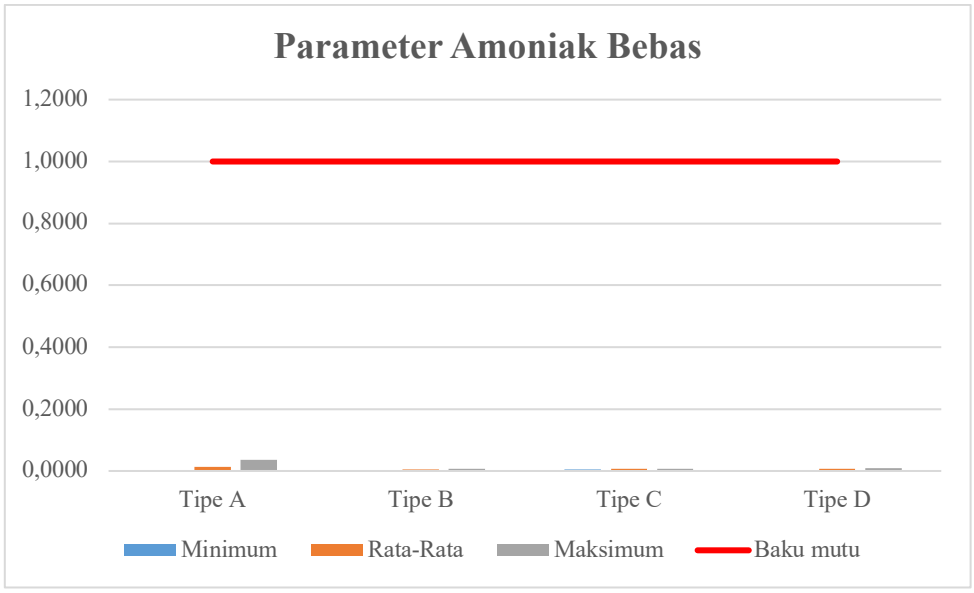
Hasil uji kualitas air limbah rumah sakit menunjukkan semua kelas rumah sakit memenuhi baku mutu parameter Minyak dan Lemak yaitu 5 mg/L. Konsentrasi minyak dan lemak tertinggi terjadi pada Rumah Sakit Tipe B dan D sebesar 1,30 mg/L. Hasil uji kualitas *outlet* air limbah rumah sakit parameter Minyak dan Lemak ditampilkan pada Gambar 23. berikut.



Gambar 23. Karakteristik *Outlet* Parameter Minyak & Lemak

4.3.8. Amoniak Bebas

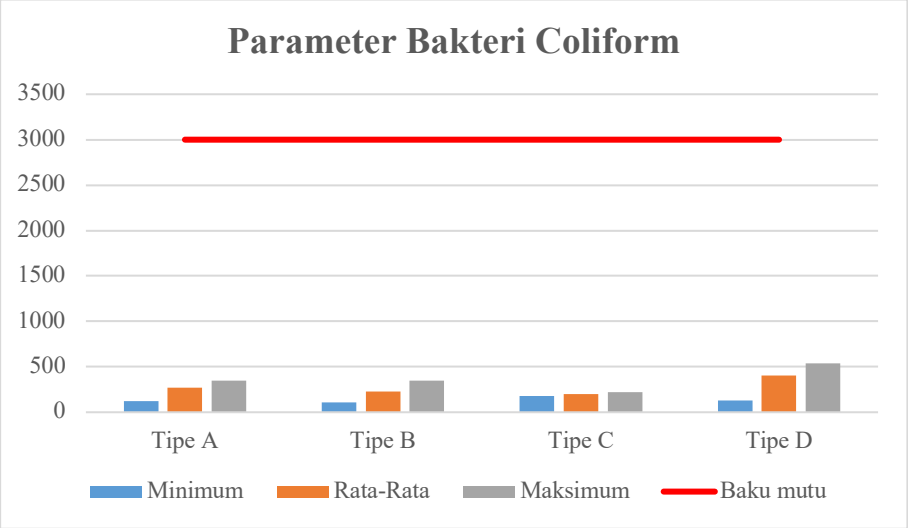
Hasil uji kualitas air limbah rumah sakit menunjukkan semua kelas rumah sakit memenuhi baku mutu parameter Amoniak Bebas yaitu 1 mg/L. Konsentrasi amoniak bebas tertinggi terjadi pada Rumah Sakit Tipe A sebesar 0,04 mg/L. Hasil uji kualitas *outlet* air limbah rumah sakit parameter Amoniak ditampilkan pada Gambar 24. berikut.



Gambar 24. Karakteristik *Outlet* Parameter Amoniak Bebas

4.3.9. Bakteri *Coliform*

Hasil uji kualitas air limbah rumah sakit menunjukkan semua kelas rumah sakit memenuhi baku mutu parameter Bakteri *Coliform* yaitu 3.000 MPN/100 ml. Konsentrasi bakteri *coliform* tertinggi terjadi pada Rumah Sakit Tipe D sebesar 540 MPN/100 ml. Hasil uji kualitas *outlet* air limbah rumah sakit parameter Bakteri *Coliform* ditampilkan pada Gambar 25. berikut.



Gambar 25. Karakteristik *Outlet* Parameter Bakteri *Coliform*

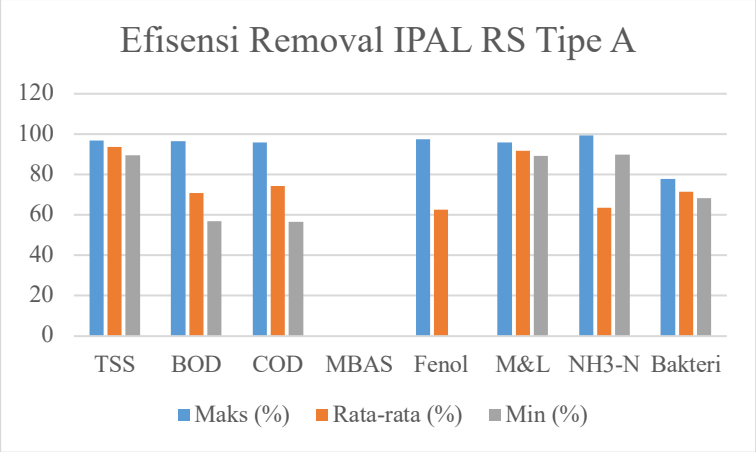
4.4. Analisa Performa Pengolahan IPAL Rumah Sakit

Analisa performal pengolahan IPAL Rumah Sakit dilakukan untuk melihat kinerja IPAL masing-masing tipe rumah sakit. Adapaun pendekatan yang digunakan dengan rumus analisis efisiensi *removal* dari *inlet* ke *outlet* dapat dihitung dengan persamaan berikut.

Efisiensi Removal(%) $= ((C_{inlet} - C_{outlet}) / C_{inlet}) \times 100\%$

4.4.1. Analisa Performa Pengolahan IPAL Rumah Sakit Tipe A

Analisa performal pengolahan IPAL Rumah Sakit Tipe A dilakukan pada semua parameter dari *inlet* dan *outlet*. Adapun hasil analisis efisiensi removal rumah sakit Tipe A ditampilkan pada Gambar 26. berikut.



Gambar 26. Efisiensi Removal IPAL Rumah Sakit Tipe A

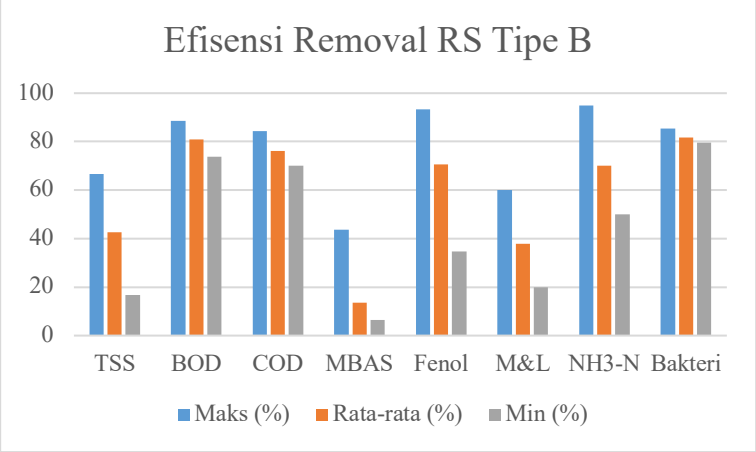
RS Tipe A menunjukkan kinerja yang cukup baik dalam mengolah limbah cair rumah sakit, terutama dalam parameter BOD, COD, dan TSS. Sistem IPAL yang digunakan mampu mengurangi kadar bahan organik dan partikel tersuspensi dengan efisiensi yang cukup tinggi, menandakan bahwa proses pengolahan biologis dan fisik berjalan dengan baik. Namun, terdapat fluktuasi yang cukup signifikan dalam parameter NH_3-N dan MBAS, yang mengindikasikan adanya potensi ketidakseimbangan dalam proses nitrifikasi dan degradasi surfaktan. Hal ini bisa disebabkan oleh kondisi beban limbah yang bervariasi setiap waktu, kualitas aerasi dalam unit pengolahan biologis, atau kurang optimalnya sistem degradasi senyawa kimia tertentu.

Secara umum Rumah Sakit Tipe yang diteliti menggunakan kombinasi Lumpur Aktif (*Aktivated Sludge*) dengan Biofilter *Anaerob-Aerob*, yang dapat menurunkan kandungan organik dan nitrogen secara optimal. Selain itu, proses pengolahan tersebut juga dilengkapi dengan unit pendukung berupa ekualisasi, sedimentasi, *sand filter*, karbon aktif, dan disinfeksi klorinasi, sehingga hasil olahan air limbah dapat memenuhi baku mutu yang berlaku. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa parameter BOD dan COD mengalami penurunan 80-85%, serta parameter TSS juga tinggi sebesar > 80% yang menandakan efektivitas dari proses sedimentasi dan filtrasi. Pada parameter Amoniak, terjadi penurunan rata-rata 75%, meskipun masih berfluktuasi. Sementara MBAS dan Fenol mengalami penurunan rata-rata 45-55%, menunjukkan keterbatasan proses biologis menguraikan senyawa persisten. Parameter minyak & lemak mengalami penurunan >70% dan Bakteri Koliform hingga 80-85% melalui unit biofilter dan disinfeksi.

Secara keseluruhan efisiensi pengolahan masih dapat dikategorikan baik, dengan hanya beberapa parameter yang membutuhkan perbaikan. Dalam meningkatkan kestabilan efisiensi, RS Tipe A perlu meningkatkan pemantauan operasional, terutama pada unit pengolahan biologis dan aerasi. Penyesuaian proses, seperti pengaturan kadar oksigen terlarut yang optimal dan penambahan mikroorganisme yang dapat membantu proses nitrifikasi, dapat dilakukan untuk memperbaiki fluktuasi pada parameter NH_3-N. Selain itu, perlu adanya regulasi terhadap penggunaan deterjen dan bahan surfaktan lainnya di rumah sakit agar tidak memberikan beban pencemar yang tinggi pada IPAL.

4.4.2. Efisiensi Removal IPAL Rumah Sakit Tipe B

Analisa performal pengolahan IPAL Rumah Sakit Tipe B dilakukan pada semua parameter dari *inlet* dan *outlet*. Adapun hasil analisis efisiensi removal rumah sakit Tipe B ditampilkan pada Gambar 27. berikut.



Gambar 27. Efisiensi Removal Rumah Sakit Tipe B

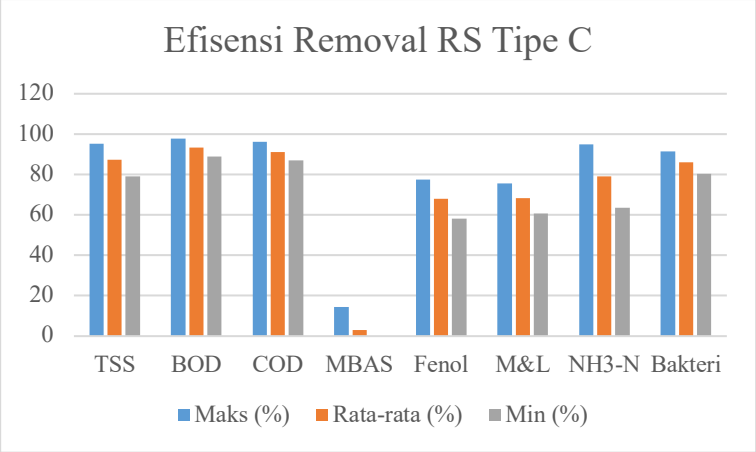
RS Tipe B memiliki sistem pengolahan limbah yang cukup efektif dalam menangani BOD dan COD, yang menunjukkan bahwa proses pengolahan biologis bekerja dengan baik dalam mengurangi kadar bahan organik. Keberhasilan ini menandakan bahwa rumah sakit telah menerapkan teknologi IPAL yang cukup stabil dalam menangani limbah medis dan domestik. Namun, parameter MBAS masih menunjukkan efisiensi yang relatif rendah, yang mengindikasikan bahwa sistem pengolahan belum sepenuhnya mampu menghilangkan zat surfaktan yang berasal dari limbah deterjen atau cairan pembersih lainnya. Hal ini dapat menjadi perhatian karena keberadaan MBAS yang tinggi dalam efluen dapat berdampak pada lingkungan perairan sekitarnya.

Rumah Sakit Tipe B menggunakan sistem IPAL berbasis proses biologis aerobik dengan extended aeration, yang terdiri dari unit ekualisasi, bioreaktor aerob, klarifier, serta bak *holding* dan kontrol. Sistem ini terbukti cukup efektif menurunkan parameter organik, dengan efisiensi removal BOD dan COD rata-rata mencapai 75-80% dan TSS sekitar 60%. Namun kinerja IPAL masih terbatas pada parameter tertentu seperti MBAS dan Fenol yang hanya mengalami penurunan 40-50% serta Amoniak yang berfluktuasi dengan rata-rata 70%. Hasil ini menunjukkan bahwa pengolahan biologis aerob dengan *extended aeration* saja belum optimal, terutama dalam menangani senyawa persisten dan nutrien.

Dalam meningkatkan efisiensi pengolahan, RS Tipe B dapat mempertimbangkan penambahan unit filtrasi tambahan atau metode adsorpsi, seperti penggunaan karbon aktif, untuk mengurangi kadar MBAS dalam limbah cair. Selain itu, penerapan sistem kontrol sumber limbah, seperti penggunaan deterjen yang lebih ramah lingkungan atau pembatasan penggunaan bahan kimia tertentu di fasilitas rumah sakit, dapat membantu mengurangi beban pencemar yang masuk ke IPAL. Peningkatan efisiensi pengolahan pada parameter ini akan memberikan dampak positif terhadap kualitas efluen yang dihasilkan dan memastikan bahwa limbah yang dibuang tetap sesuai dengan baku mutu lingkungan.

4.4.3. Analisa Performa Pengolahan IPAL Rumah Sakit Tipe C

Analisa performal pengolahan IPAL Rumah Sakit Tipe C dilakukan pada semua parameter dari *inlet* dan *outlet*. Adapun hasil analisis efisiensi removal rumah sakit Tipe C ditampilkan pada Gambar 28. berikut.



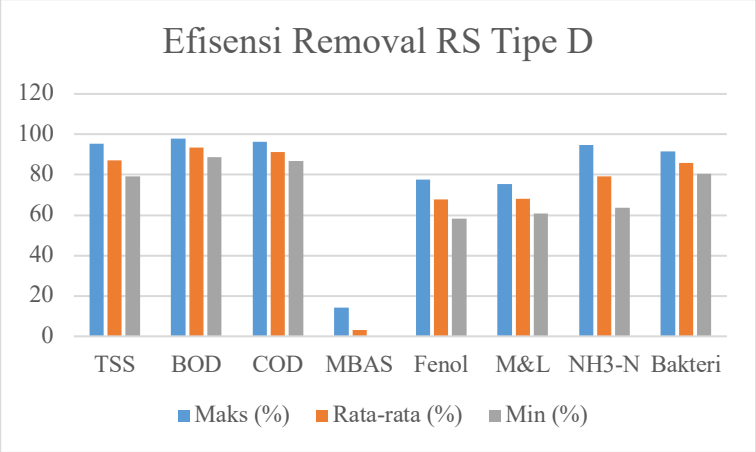
Gambar 28. Efisiensi Removal Rumah Sakit Tipe C

Rumah sakit tipe C yang diteliti menggunakan sistem kombinasi *anaerob-aerob*, yang terbukti cukup efektif dalam mengurangi kandungan polutan pada air limbah. Hasil analisis efisiensi *removal* menunjukkan bahwa parameter BOD dapat diturunkan dengan rata-rata sekitar 90%, sedangkan COD menfapai efisiensi rata-rata 85-88%. Parameter TSS juga meengalami penurunan tinggi yakni sekitar 85-90%, yang menunjukkan adanya proses sedimentasi dan filtrasi. Namun demikian, terdapat parameter yang tidak menunjukkan hasil optimal seperti MBAS (surfaktan) sebesar 10-15%, yang menandakan bahwa sistem biologi *anaerob-aerob* masih kurang efektif menguraikan senyawa deterjen. Selanjutnya parameter Fenol mengalami efisiensi *removal* sebesar 55-60% serta parameter Minyak dan Lemak dapat diturunkan sebesar 80-85%. Penurunan parameter Bakteri *Coliform* juga signifikan, yaitu 80-90%, sehingga kontaminasi mikrobiologis dapat ditekan.

Secara umum, performa IPAL Rumah Sakit Tipe C dapat dikategorikan baik, terutama pada parameter organik (BOD, COD, TSS dan Amoniak). Meski demikan, kelemahan masih terlihat pada senyawa persisten seperti MBAS dan Fenol yang memerlukan perlakukan tambahan seperti adsorpsi karbon aktif, *sand filter* atau teknologi berbasis membran lainnya.

4.4.4. Analisa Performa Pengolahan IPAL Rumah Sakit Tipe D

Analisa performal pengolahan IPAL Rumah Sakit Tipe D dilakukan pada semua parameter dari *inlet* dan *outlet*. Adapun hasil analisis efisiensi *removal* rumah sakit Tipe D ditampilkan pada Gambar 29. berikut.



Gambar 29. Efisiensi *Removal* Rumah Sakit Tipe D

Rumah Sakit Tipe D yang diteliti menggunakan sistem pengolahan biologis *anaerob-aerob*, yang cukup efektif menurunkan beban pencemar. Grafik menunjukkan efisiensi tertinggi pada parameter BOD >90%, COD 85-88%, TSS 80-85%, serta Amoniak 65-80%, menandakan proses degradasi organik dan nitrifikasi berjalan baik. Meskipun demikian, terdapat efisiensi beberapa parameter yang belum optimal seperti MBAS 20-25% dan Fenol(55-60% masih rendah, sehingga perlu tambahan unit seperti karbon aktif dan oksidasi lanjut. Selain itu parameter Minyak dan Lemak mencapai 70-75%, sedangkan penurunan bakteri 80-95% menunjukkan efektivitas pengolahan dari aspek mikrobiologis. Secara umum kinerja IPAL di Rumah Sakit Tipe D baik untuk polutan organik, namun perlu unit tambahan agar optimal menyisihkan parameter persisten seperti MBAS dan Fenol.

Berdasarkan analisis efisiensi pengolahan air limbah di 4 (empat) tipe rumah sakit, terlihat adanya variasi signifikan dalam kinerja sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Beberapa rumah sakit menunjukkan efisiensi tinggi dalam parameter tertentu, sementara yang lain masih mengalami tantangan dalam mengelola kualitas *efluent* yang dihasilkan. Secara umum, sistem IPAL di setiap rumah sakit sudah berfungsi dengan baik dalam mengurangi kadar pencemar utama seperti **BOD, COD, dan TSS**, meskipun masih

terdapat beberapa parameter yang perlu diperhatikan lebih lanjut, seperti **MBAS, Fenol dan NH_3-N**, yang menunjukkan fluktuasi dalam efisiensi removalnya.

Hasil temuan diatas sejalan dengan penelitian sebelumnya, seperti MBAS yang memiliki resistansi tinggi terhadap metode pengolahan biologis konvensional, sehingga menyebabkan penghilangan yang tidak sempurna dan meningkatkan potensi toksisitas di *efluent* (Mackul'ak et al., 2021). Selain itu, fenol juga termasuk senyawa yang bersifat toksik dan dapat menghambat aktivitas mikroba dalam sistem pengolahan, yang berdampak pada proses degradasi yang tidak optimal (Khadir et al., 2020). Sementara itu NH_3-N seringkali kesulitan untuk mencapai target efisiensi removal (Kootenaei & Rad, 2013).

Sebagai alternatif lanjutan, maka dalam pengolahan air limbah dapat dilakukan penambahan unit pengolahan lanjutan (*advanced treatment*) seperti Filter Karbon Aktif untuk menyerap senyawa persisten seperti MBAS dan Fenol; Proses Oksidasi Lanjutan (*Advanced Oxidation Processes*/AOPs) seperti ozonisasi atau kombinasi UV/H2)2, yang mampu mendegradasi senyawa toksik dan sulit diuraikan oleh proses biologis; Sistem berbasis Membran (misalnya MBR), yang dapat meningkatkan penyisihan polutan sekaligus menjaga kualitas *effluent* lebih stabil.

4.5. Analisis Opsi Teknologi Pengolahan Air Limbah Rumah Sakit

Berdasarkan hasil analisis efisiensi removal diatas, ada beberapa rekomendasi yang dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah rumah sakit:

1. Optimasi Proses Biologis dan Kimiawi
   Beberapa rumah sakit menunjukkan fluktuasi pada parameter NH_3-N dan MBAS, yang dapat diperbaiki dengan meningkatkan proses aerasi dan penambahan agen pengolah yang sesuai.
2. Pemantauan dan Evaluasi Berkala
   Menjaga konsistensi efisiensi, setiap rumah sakit perlu melakukan pemantauan secara rutin terhadap sistem IPAL serta mengevaluasi kinerjanya secara berkala.
3. Peningkatan Teknologi Pengolahan
   Rumah sakit dengan efisiensi yang rendah pada parameter tertentu dapat mempertimbangkan peningkatan teknologi seperti penggunaan filter tambahan, koagulan, atau metode biologis yang lebih efektif.

4. Pengelolaan Sumber Limbah

   Untuk mengurangi beban pencemar yang masuk ke IPAL, rumah sakit dapat melakukan kontrol terhadap sumber limbah, misalnya dengan mengatur penggunaan deterjen atau bahan kimia tertentu.

Terdapat beberapa rekomendasi pengolahan air limbah rumah sakit yang dapat diuraikan berdasarkan kelompok pencemarnya serta alternatif teknoogi pengolahan air limbahnya. Alternatif pengolahan air limbah berdasarkan kelompok pencemar ditampilkan pada Tabel 10. berikut ini.

Tabel 11. Opsi Pemilihan Teknologi IPAL berdasarkan Kelompok Pencemar

Kelompok Pencemar	Penjelasan	Parameter	Pilihan Teknologi Pengolahan	Parameter Desain
Bahan Organik	Senyawa organik yang berasal dari limbah medis, laboratorium, dan domestik yang menyebabkan penurunan oksigen dalam air penerima.	BOD, COD	- Lumpur aktif - *Trickling filter* - *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) - *Sequencing Batch Reactor* (SBR) - *Anaerobic Baffled Reactor* (ABR) - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB)	- *Hydraulic Retention Time* (HRT) - *Organic Loading Rate* (OLR) - *Mixed Liquor Suspended Solids* (MLSS) - *Food to Microorganism Ratio* (F/M)
Padatan Tersuspensi	Material organik dan anorganik dalam bentuk partikel tersuspensi yang dapat berasal dari pencucian alat kesehatan dan limbah domestik.	TSS	- Sedimentasi primer dan sekunder - Filtrasi pasir cepat - Filtrasi membran (ultrafiltrasi, microfiltrasi) - Koagulasi-flokulasi	- *Detention time* - *Overflow rate* - Dosis koagulan (Alum, PAC, $FeCl_3$) - Ukuran pori membran
Nutrien (Nitrogen & Fosfor)	Nutrien yang berasal dari urin, bahan kimia laboratorium, dan farmasi yang dapat menyebabkan eutrofikasi di badan air penerima.	NH_3-N, NO_3, TN, PO_4	- Nitrifikasi-denitrifikasi - Lumpur aktif dengan anoxic tank - Biofilter *anaerob-aerob* - *Anaerobic Ammonium Oxidation* (Anammox)	- *Sludge Age* - *Dissolved Oxygen* (DO) - Rasio C/N/P - *Hydraulic Retention Time* (HRT)
Surfaktan & Deterjen	Senyawa aktif permukaan dari sabun, deterjen, dan bahan pembersih yang menyebabkan pembentukan busa dalam sistem pengolahan air limbah.	MBAS	- Adsorpsi karbon aktif - Ozonisasi - *Reverse Osmosis* (RO) - Bioreaktor membran (MBR)	- Kapasitas karbon aktif - Dosis ozon - *Pressure drop* RO - Ukuran pori membran

Kelompok Pencemar	Penjelasan	Parameter	Pilihan Teknologi Pengolahan	Parameter Desain
Senyawa Fenol & Organik Beracun	Senyawa organik toksik dari limbah farmasi dan desinfektan yang bersifat karsinogenik serta mengganggu kesehatan manusia dan ekosistem.	Fenol, TOC	- Oksidasi biologis (lumpur aktif) - Oksidasi kimia (Fenton, Ozon) - Adsorpsi karbon aktif - Elektrokoagulasi	- Dosis H_2O_2/Fe^{2+} (Fenton) - Waktu kontak adsorpsi - Tegangan elektrokoagulasi
Bakteri & Patogen	Mikroorganisme berbahaya dari limbah medis yang dapat menyebabkan infeksi dan penyebaran penyakit.	Total Coliform, E. coli	- Klorinasi - Ozonisasi - Sinar UV - Elektrokimia	- Dosis klorin (mg/L) - Intensitas UV (mJ/cm^2) - Waktu kontak ozon
Residu Obat & Bahan Kimia	Limbah farmasi dan laboratorium yang mengandung antibiotik, hormon, dan senyawa aktif lainnya yang sulit terurai di lingkungan.	API (*Active Pharmaceutical Ingredients*)	- *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) - Fotokatalisis TiO_2 - Adsorpsi karbon aktif - Reverse Osmosis (RO)	- Dosis oksidator (O_3, H_2O_2) - Efisiensi fotokatalis - Waktu kontak adsorpsi
Minyak & Lemak	Senyawa hidrofobik dari limbah dapur rumah sakit yang dapat menyebabkan penyumbatan dan gangguan pengolahan limbah.	Minyak & Lemak (FOG)	- *Grease trap* - DAF (*Dissolved Air Flotation*) - Biofilter anaerobik - Adsorpsi karbon aktif	- Waktu tinggal grease trap - Tekanan udara DAF - Kapasitas biofilte

Sumber: Hasil Analisis, 2025

4.5.1. Analisis Kesesuaian dengan Kriteria Desain Beban Pengolahan

Dalam melakukan analisis beban pengolahan, maka perlu ditentukan debit dan kapasitas air limbah rumah sakit yang direncanakn. Penentuan debit dan kapasitas air limbah tersebut dibedakan sesuai tipe rumah sakit dan kapasitas pelayanan yang tercantum dalam Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 3 Tahun 2020 tentang Klasifikasi dan Perizinan Rumah Sakit serta persyaratan desain IPAL rumah sakit sesuai dengan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 7 Tahun 2019 tentang Kesehatan Lingkungan Rumah Sakit. Hasil perhitungan debit dan kapasitas air limbah kemudian dijumlah dengan konsentrasi BOD dan COD yang dikaji.

Perhitungan beban pengolahan berdasarkan debit air limbah yang dihasilkan dan *influen* BOD maupun COD yang masuk ke instalasi pengolahan air limbah. Perhitungan debit air limbah berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 7 Tahun 2019 tenntang Kesehatan Lingkungan Rumah Sakit. Menurut peraturan tersebut standar penyediaan air kebutuhan higien dan sanitasi dibedakan berdasarkan tipe rumah sakit. Adapun rentang kebutuhan air pada tiap rumah sakit sebagai berikut.

- Rumah Sakit Tipe A = 400-450 L/Tempat Tidur
- Rumah Sakit Tipe B = 400-450 L/Tempat Tidur
- Rumah Sakit Tipe C = 200-300 L/Tempat Tidur
- Rumah Sakit Tipe D = 200-300 L/Tempat Tidur

Berdasarkan kriteria rentang kebutuhan air minimum rumah sakit tersebut dapat dihitung air limbah berdasarkan kebutuhan air bersih.

1. Kebutuhan Air Bersih Minimal Rumah Sakit A
   Total Keb. Air Layanan Minimal = Jumlah TT x Keb. Air Layanan Minimal
   Total Keb. Air Layanan Minimal = 250 Tempat Tidur x 450 Liter/Tempat Tidur
   Total Keb.Air Layanan Minimal = 112.500 Liter/Hari
2. Keb. Air Layanan Pendukung (20%) = 20% x Total Keb. Air Layanan Minimal
   = 22.500 L/hari
   Total Keb. Air Rumah Sakit = 135 m^3/hari
3. Timbulan Air Limbah = 80% x 135 m^3/hari
   = 108 m^3/hari
4. *Factor Safety* = 10% x 108 m^3/hari
   = 10,80 m^3/hari
5. Volume Desain Minimal IPAL = SF + Timbulan Air Limbah
   = 118,8 m^3/hari

6. Beban BOD $= \frac{\text{Debit Air Limbah } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hari}}\right) \text{ x Konsentrasi BOD } \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}}\right)}{1000}$

$= 25{,}54 \text{ kg.BOD/m}^3\text{.hari}$

7. Beban COD $= \frac{\text{Debit Air Limbah } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hari}}\right) \text{ x Konsentrasi COD } \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}}\right)}{1000}$

$= 51{,}20 \text{ kg.BOD/m}^3\text{.hari}$

Perhitungan Timbulan air limbah dan beban pengolahan pada tipe rumah sakit B,C,dan D dihitung dengan persamaan yang sama. Adapun hasil perhitungan terhadap tipe rumah sakit lainnya ditampilkan pada Tabel 12.

Selanjutnya dilakukan perhitungan beban pengolahan masing-masing tipe rumah sakit menjadi parameter pemilihan teknologi Instalasi pengolahan air limbah terpilih. Terdapat dua tipe teknologi IPAL pada Tabel 13 yaitu *Suspended Growth* dan *Attached Growth*. Pemilihan Teknologi berdasarkan pertimbangan beban organik (*organic loading rate*), tiap unit mempunyai kapasitas berbeda terhadap beban pengolahan organik. Adapun persamaan dalam menghitung *Organic Loading Rate* dihitung pada persamaan berikut.

$$\text{OLR} = \frac{\text{MBOD/COD}}{\text{Volume Reaktor}} \left(\frac{kg\ BOD}{m^3} \cdot hari\right)$$

Keterangan :

- MBOD/COD = Beban BOD atau COD
- Volume Reaktor = HRT X Debit
- HRT = Waktu tinggal Air Limbah (jam)

Contoh perhitungan OLR Lumpur aktif standar dihitung berdasarkan persamaan dan poin-poin sebagai berikut.

1. Volume Reaktor Lumpur Aktif = HRT X Debit air limbah

   $= 6 \text{ jam x } 4{,}95 \text{ m}^3\text{/jam}$

   $= 29{,}7 \text{ m}^3$

2. *Organic Loading Rate* $= \frac{\text{MBOD/COD}}{\text{Volume Reaktor}} \left(\frac{kg\ BOD}{m^3} \cdot hari\right)$

   $= \frac{25{,}54}{29{,}7} \left(\frac{kg\ BOD}{m^3} \cdot hari\right)$

   $= 0{,}86 \text{ kg.BOD/m}^3\text{.hari}$

Perhitungan beban organic pada unit dan tipe rumah sakit lainnya ditampilkan pada Tabel 13. Pada Tabel 13 semua tipe rumah sakit memiliki nilai OLR yang sama, hal ini disebabkan karakteristik air limbah BOD dan COD pada tiap rumah sakit adalah sama.

Tabel 12. Perhitungan Beban Pengolahan

Tipe RS	Kapasitas Layanan Minimal	kebutuhan Air Layanan Minimal	Total kebutuhan Air Layanan Minimal	Kebutuhan Air Layanan Pendukung (20%)	Total Kebutuhan Air	Total timbulan Air Limbah	*Safety Factor* 10%	Kapasitas desain IPAL minimal	Konsentrasi Rata-rata		Beban BOD	Beban COD
	TT	L/TT	L/hari	L/hari	m^3/hari	m^3/hari	m^3	m^3	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	kg/m^3.hari	kg/m^3.hari
TIPE A	250	450	112500	22500	135	108	10,80	118,8	215	431	25,54	51,20
TIPE B	200	400	80000	16000	96	76,8	7,68	84,5	215	431	18,16	36,41
TIPE C	100	300	30000	6000	36	28,8	2,88	31,7	215	431	6,81	13,65
TIPE D	50	250	12500	2500	15	12	1,20	13,2	215	431	2,84	5,69

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Keterangan: *) Permenkes RI No. 3 Tahun 2020; **) Permenkes RI No. 7 Tahun 2019

Tabel 13. Analisa Kesesuaian dengan Beban Pengolahan

Unit Teknologi	Range Tipikal	RS tipe A	RS tipe B	RS tipe C	RS tipe D	Keterangan
Lumpur Aktif						
- Lumpur aktif standar (Kg BOD/m^3.hari)	0,3-0,8	0,860	0,860	0,860	0,860	tidak sesuai
- *Step Aeration* (Kg BOD/m3.hari)	0,4-1,4	1,290	1,290	1,290	1,290	sesuai
- *Modified Aeration* (Kg BOD/m3.hari)	0,6-2,4	3,440	3,440	3,440	3,440	tidak sesuai
- *Contact Stabilization* (Kg BOD/m3.hari)	0,8-1,4	1,032	1,032	1,032	1,032	sesuai
- *High Rate Aeration* (Kg BOD/m3.hari)	0,6-2,4	2,580	2,580	2,580	2,580	tidak sesuai
- *Pure Oxygen Process* (Kg BOD/m3.hari)	1-2	5,160	5,160	5,160	5,160	tidak sesuai
- *Oxidation Ditch* (Kg BOD/m3.hari)	0,1-2	0,215	0,215	0,215	0,215	sesuai
- *Extended Aeration* (Kg BOD/m3.hari)	0,15-0,25	0,323	0,323	0,323	0,323	tidak sesai
Biofilter Aerob Anaerob (Kg BOD/m^3.hari)	1,5-6	1,720	1,720	1,720	1,720	sesuai
UASB (Kg COD/m^3.hari)	5-10	1,290	1,290	1,290	1,290	tidak sesuai
ABR (Kg COD/m^3.hari)	<3	0,645	0,645	0,645	0,645	sesuai
SBR (Kg BOD/m^3.hari)	0,1-0,3	0,860	0,860	0,860	0,860	tidak sesuai
MBR (Kg COD/m^3.hari)	2-4	1,290	1,290	1,290	1,290	sesuai
MBBR (Kg BOD/m^3.hari)	1-1,4	1,290	1,290	1,290	1,290	sesuai

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Setelah dilakukan analisis kesesuaian kriteria desain dengan beban pengolahan (pada Tabel 13.), maka diketahui jenis teknologi pengolahan air limbah limbah rumah sakit yang sesuai yaitu:

a) Lumpur Aktif (*Step Aeration* dan *Oxidation Ditch*)
b) Biofilter Aerob Anaerob
c) ABR
d) MBR
e) MBBR

Hasil analisis diatas merupakan analisis menggunakan data debit normatif dari kapasitas layanan masing-masing tipe rumah sakit beserta konsentrasi BOD dan COD hasil penelitian. Dalam pelaksanaannya, tentu perlu dilakukan perhitungan debit dan kapasitas IPAL dan konsentrasi sesuai dengan data yang direncanakan.

4.5.2. Analisa Efisiensi Removal

Analisa efisiensi removal dilakukan menggunakan data referensi yang menguraikan masing-masing teknologi yaitu lumpur aktif, biofilter *anaerob-aerob*, UASB, ABR, SBR, MBR, dan MBBR yang diuraikan sebagai berikut.

4.5.2.1 Lumpur Aktif (*Activated Sludge*)

Penggunaan teknologi lumpur aktif dapat mencapai efisiensi penyisihan BOD, COD, dan *Coliform* secara signifikan, yang menunjukkan potensi untuk mengolah air limbah rumah sakit yang kompleks (Custodio et al., 2022). Proses pengolahan dengan teknologi lumpur aktif dapat menyisihkan BOD dan COD dalam air limbah hingga 95% dan (Kumar et al., 2023). Proses penyisihan BOD dan COD dengan lumpur aktif dapat berjalan dengan efektif, namun terdapat tantangan terutama terjadinya busa dan pembentukan lumpur dalam jumlah besar yang dapat berdampak pada efisiensi operasional dan pemeliharaan (Scarim et al., 2023).

Tabel 14. Efisiensi Removal Teknologi Lumpur Aktif

Unit Teknologi	Efisiensi Removal
Lumpur Aktif Standar	85 – 95%
Step Aeration	85 – 95%
Modified Aeration	60 – 75%

Unit Teknologi	Efisiensi Removal
Contact Stabilization	80 – 90%
High Rate Aeration	75 – 90%
Pure Oxygen Process	85 – 95%
Oxidation Ditch	75 – 95%
Extended Aeration	75-95%

Sumber: Kemenkes RI, 2011; Depkes RI, 2009

4.5.2.2 Biofilter Aerob-Anaerob

Dalam penelitian (Hayati, 2023), penggunaan biofilter Anaerobik-Aerobik di Rumah Sakit Pondok Indah dapat menyisihkan BOD sebesar 93,33%, COD 85,54% dan TSS 46,67%. Penggunaan biofilter *anarob-aerob* juga dapat menyisihkan Amonia 81-85% dengan memperhatikan pemilihan media yang tepat untuk pertumbuhan bakteri nitrifikasi (Yani et al., 2013). Jika dibandingkan dengan SNI 9294:2024, penelitian tersebut masih sesuai efisiensi penyisihan parameter air limbah yang telah ditetapkan. Selain itu, penggunaan biofilter *aerob-anaerob* juga dapat menyisihkan parameter MBAS dengan rentang 56-88% (Said, 2005) serta penambahan desinfeksi yang dapat menyisihkan Total *Coliform* hingga 99% (Said et al., 2024).

Tabel 15. Efisiensi Removal Biofilter Aerob Anaerob

Parameter	Efisiensi Penyisihan (%)		
	Biofilter Anaerobik	**Biofilter Aerobik**	**Biofilter Anaerobik-Aerobik**
pH	-	-	-
BOD	60-75	70-90	80-95
COD	60-75	70-90	80-95
TSS	20-30	20-30	20-30
Amonia (NH_3-N)	10-40	40-80	70-90
Minyak & Lemak	-	-	-
Total Koliform	-	-	-

Sumber: SNI 9294:2024

4.5.2.3 *Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB*

Sistem UASB sangat efektif dalam menyisihkan parameter organik dalam air limbah, dimana tingkat efisiensi BOD sebesar 98% dan COD sebesar 93% (Arthur et al., 2022). Sistem UASB telah berhasil dalam mengolah berbagai jenis air limbah baik air limbah sintetis, pembuatan kertas, dan industri kulit (Derakhsesh et al., 2024), yang mana

kemampuan adaptasi ini dapat disesuaikan untuk mengolah karakteristik spesifik seperti air limbah rumah sakit. Penelitian (Abqari, 2011), menunjukkan penggunaan UASB dapat menurunkan TSS 90-100% dan Amoniak 91-100%.

4.5.2.4 *Anarobic Baffled Reactor (ABR)*

Berdasarkan penelitian (Ullah et al., 2024), sistem ABR dapat menyisihkan parameter organik sebesar 60-70%, TSS sebesar 74-81%, total nitrogen sebesar 50-66%, dan total phosporus sebesar 47-57%. Dalam penelitian lain, sistem ABR dapat mencapai efisiensi penyisihan COD berkisar 56-75% tergantung pada HRT, hal ini perlu memperhatikan HRT yang optimal untuk penyisihan COD yang efektif (Mahdi et al., 2022).

4.5.2.5 *Sequence Batch Reactor (SBR)*

Penelitian menunjukkan bahwa SRT antara 15 hingga 25 hari dapat menghasilkan pengurangan COD lebih dari 84% dan pengurangan BOD_5 lebih dari 90%, yang menunjukkan kapasitas reaktor dalam proses biodegradabilitas (Carrasquero et al., 2025). Waktu Siklus: Siklus operasional selama 8 jam terbukti mengoptimalkan penghilangan nutrien, terutama nitrogen dan fosfor, melalui asimilasi biologis (Carrasquero et al., 2025). Hasil penelitian (Haque, 2017) proses SBR juga dapat menyisihkan amonia berkisar antara 45 – 97%.

4.5.2.6 *Membran Bioreactor (MBR)*

Berdasarkan penelitian (Hernaningsih, 2014), jika dibandingkan lumpur aktif, teknologi MBR dapat menghilangkan COD >95%, selain itu juga dapat menghilangkan amonia lebih besar dari 90%.

4.5.2.7 *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR)

Sistem MBBR menunjukkan penyisihan BOD sebesar 85,23%, COD sebesar 81,69%, Amonia 54,45% dalam air limbah domestik, hal ini mengindikasikan potensi penyisihan dalam pengolahan air limbah rumah sakit (Eid et al., 2024). Dalam air limbah rumah sakit, sistem MBBR juga menunjukkan penghilangan minyak & lemak secara signifikan dalam air limbah rumah sakit dengan efisiensi 98,9% (Shokohi et al., 2018). Selain itu, sistem MBBR juga dapat menyisihkan parameter fenol > 96% dalam kondisi optimal (Zwain et al., 2019).

Berdasarkan hasil analisis efisiensi removal dari berbagai literatur, maka dapat disimpulkan berbagai parameter yang dapat diolah pada masing-masing unit teknologi. Adapun rekapitulasi efisiensi removal masing-masing teknologi disajikan pada Tabel 15. berikut.

Tabel 16. Rekapitulasi Efisiensi Removal setiap Unit Teknologi

No.	Opsi Teknologi	Persentase (%) Efisiensi Removal								Sumber
		TSS	BOD	COD	MBAS	Fenol	M&L	NH_3-N	Total Coliform	
1.	Lumpur Aktif									
	- Lumpur Aktif Standar	-	90%	85%	-	-	-	-	-	Kemenkes RI, 2011, Depkes RI, 2009
	- *Step Aeration*	-	90%	85%	-	-	-	-	-	Kemenkes RI, 2011, Depkes RI, 2009
	- *Modified Aeration*	-	75%	70%	-	-	-	-	-	Kemenkes RI, 2011, Depkes RI, 2009
	- *Contact Stabilization*	-	85%	80%	-	-	-	-	-	Kemenkes RI, 2011, Depkes RI, 2009
	- *High Rate Aeration*	-	85%	80%	-	-	-	-	-	Kemenkes RI, 2011, Depkes RI, 2009
	- *Pure Oxygen Process*	-	90%	85%	-	-	-	-	-	Kemenkes RI, 2011, Depkes RI, 2009
	- *Oxidation Ditch*	-	80%	75%	-	-	-	-	-	Kemenkes RI, 2011, Depkes RI, 2009
	- *Extended Aeration*	-	85%	80%	-	-	-	-	-	Kemenkes RI, 2011, Depkes RI, 2009
2.	Biofilter Aerob Anaerob	20%	90%	90%	75%	-	-	85%	-	RSNI3 9294:2024; Sulistyaningrum, 2012
3.	UASB	70%	90%	90%	-	-	-	90%	-	Arthur et al., 2022; Derakesh et al., 2024; Abqari, 2011
4.	ABR	75%	75%	70%	-	-	85%	51%	-	Ullah et al., 2024; Mahdi et al., 2022
5.	SBR	-	90%	90%	-	-		85%	-	Carrasquero et al., 2025; Haque, 2017
6.	MBR	-	95%	95%	-	-		90%	-	Hernaningsih, 2014
7.	MBBR	-	85,32%	81,69%	-	85%	85%	54%	-	Eid et al., 2024; Shokohi et al., 2018; Zwain et al., 2019

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Berdasarkan Tabel 15., terdapat beberapa parameter lainnya yang perlu ditambahkan unit *pre-treatment* seperti parameter TSS, MBAS, dan Fenol, serta perlu adanya unit klorinasi atau sejenisnya untuk menyisihkan Total *Coliform*. Penyisihan parameter-parameter tersebut juga sesuai dengan pedoman dalam Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 40 Tahun 2022 tentang Persyaratan Teknis Bangunan, Prasarana, dan Peralatan Kesehatan Rumah Sakit, yaitu:

a) Pada sumber instalasi gedung dilakukan pipa pemisah antara air limbah yang sifatnya *greywater* dan *blackwater*.
b) Air limbah dari toilet, laundry, aktivitas kantor dan ruangan lainnya dialirkan menuju *septic tank* terlebih dahulu sebagai *pre-treatment* untuk pengendapan lumpur, kemudian airnya dialirkan ke IPAL.
c) Selanjutnya air limbah dari dapur dilakukan pemisahan melalui (*grease trap*) terlebih dahulu sebelum disalurkan menuju IPAL.
d) Proses ini bertujuan untuk mengurangi beban air limbah dan lumpur yang masuk ke IPAL termasuk, mengurangi timbulan bau, serta mengurangi kebutuhan air untuk penggelontoran saluran.

- **Air Limbah dari Dapur**

  Air limbah dari dapur memiliki karakteristik minyak & lemak yang tinggi, sehingga perlu dilakukan pengolahan awal (*pre-treatment*) berupa *Grease Trap*. Grease trap dapat menyisihkan menyisihkan minyak & lemak hingga mencapai 95% (Wisesa & Slamet, 2016). Dalam penelitian (Hurrahman et al., 2022) penggunaan grease trap dengan biofilter anarob-aerob dapat menyisihkan minyak & lemak sebesar 80,37%.

- **Air Limbah *Laundry***

  Air limbah dari biasanya memiliki karakteristik khusus seperti surfaktan, minyak dan lemak serta padatan tersuspensi. Dalam melakukan pengolahan air limbah laundy baiknya disiapkan *pre-treatment* berupa Grease Trap/Fat Separator, Bak Ekualisasi, Koaguluasi-Flokulasi-Sedimentasi.

- **Air Limbah Laboratorium**

  Air limbah dari laboratorium rumah sakit umumnya berasal dari proses analisa medis dan riset, yang mengandung bahan kimia seperti asam kuat (HCl, H_2SO_4), basa (NaOH), pelarut organik (formalin, xilen), serta residu logam berat dan zat toksik lainnya. Sebelum masuk ke IPAL diperlukan pengolahan awal terlebih dahulu untuk menghindari

inhibisi mikroba IPAL akibat bahan kimia toksis, menetralkan pH sesuai dengan rentang proses biologis serta mengurangi residu berbahaya. Opsi pengolahan pre-treatment dapat berupa netralisasi, koagulasi-flokuasi atau activated carbon.

- **Air Limbah dari Ruang Operasi dan Isolasi**

  Air limbah dari ruang operasi dan ruang isolasi umumnya memliki risiko yang lebih tinggi karena mengandung patogen (virus, bakteri, parasit), darah, cairan tubuh, farmasi. Dalam melakukan pengolahan air limbah, maka diperlukan pre-treatment pada unit ini berupa Desinfeksi atau teknologi lebih lanjut juga dapat menggunakan *Advanced Oxidation Process* (AOPs).

  Pengolahan awal ini diperlukan karena mikroorganisme patogen seperti bakteri resisten (MRSA, CRE) atau virus berpotensi mengkontaminasi sistem IPAL dan mengganggu stabilitas ekosistem biologis di reaktor. Studi di Rumah Sakit Umum Daerah Banyumas menggunakan sistem AOPS ditambah media sarang tawon dapat menyisihkan BOD 41,67%, COD 33,3%, TSS 26,67%, Minyak dan Lemak 37,5% serta Total Coliform 79,17% (Yuniarto, 2024).

  Penelitian (Honarmandrat et al., 2021) penggunaan AOPs dengan ozonasi kalsium peroksida dapat menyisihkan parameter Fenon hingga 97,8% pada kondisi yang optimal dengan waktu kontan 90 menit, sedangkan menggunakan UV/SO_3/ZnO dapat mengurangi hingga 98,8% dengan waktu kontak 30 menit (Firoozi et al., 2023). Penggunaan kombinasi ozon dengan hidrogen peroksida juga dapat mencapai efisiensi 99,79-100% dalam penyisihan bakteri koliform dengan waktu kontak 10-20 menit (Malakootian et al., 2015).

- **Penyisihan Total Coliform**

  Setelah proses *secondary treatment* (biologis) di IPAL rumah sakit, air limbah masih berpotensi mengandung Total Coliform yang berasal dari limbah domestik dan medis. Total Coliform merupakan indikator keberadaan mikroorganisme patogen yang membahayakan kesehatan dan dapat mencemari badan air penerima. Oleh karena itu, diperlukan proses disinfeksi (post-treatment) untuk memastikan bahwa effluent aman sebelum dilepas ke lingkungan. Beberapa alternatif yang dapat digunakan seperti klorinasi, sinar UV, atau ozonisasi.

Penelitian (Saleem & Bukhari, 2008), penggunaan klorinasi dalam IPAL dapat menyisihkan total coliform dan fecal coliform hingga 99,7%. Proses klorinasi dalam air limbah rumah sakit dapat menurunkan coliform sebesar 98,21% pada waktu kontak 30 menit dan 98,83% pada waktu kontak 40 menit (Busyairi et al., 2016). Penggunaan sinar UV sebagai disinfkesi biasanya pada panjang gelombang 254 nm yang ampuh dalam melawan spektrum patogen yang lebih luas seperti bakteri, virus, dan protozoa (Adeniyi & Jimoh, 2024). (Penelitian (Winarti 2020), menunjukkan penggunaan sinar ultra violet dapat menurunkan total coliform hingga 99,9%.

Selanjutnya dilakukan Penilaian efisiensi removal dilakukan berdasarkan parameter BOD, COD, nutrien (NH_3–N), dan indikator mikrobiologi. Skoring kemudian dikonversi ke skala 1–5 secara komparatif. Teknologi dengan efisiensi ≥90% dan kemampuan nitrifikasi–denitrifikasi tinggi diberi skor 5, sedangkan teknologi dengan efisiensi 75–85% mendapat skor 3–4. ABR dan Oxidation Ditch menunjukkan efisiensi sedang sehingga memperoleh skor 3. Dengan demikian, SBR, MBR, UASB, *Biofilter Aerob–Anaerob*, dan *Pure Oxygen Process* termasuk kategori paling efisien.

Tabel 17. Skoring Kualitas Efisiensi Removal

Unit Teknologi	Skor	Kategori
Lumpur Aktif		
-Lumpur Aktif Standar	4	Tinggi
-*Step Aeration*	4	Tinggi
-*Modified Aeration*	3	Sedang
-*Contact Stabilization*	4	Tinggi
-*High Rate Aeration*	4	Tinggi
-*Pure Oxygen Process*	5	Sangat Tinggi
-*Oxidation Ditch*	3	Sedang
-*Extended Aeration*	4	Tinggi
Biofilter Aerob Anaerob	5	Sangat Tinggi
UASB	5	Sangat Tinggi
ABR	3	Sedang
SBR	5	Sangat Tinggi
MBR	5	Sangat Tinggi
MBBR	4	Tinggi

4.5.3. Analisa Kebutuhan Lahan

Kebutuhan lahan merupakan faktor penting dalam pemilihan teknologi IPAL, terutama pada rumah sakit yang umumnya memiliki keterbatasan ruang dan prioritas penggunaan lahan untuk fasilitas pelayanan medis. Besarnya kebutuhan lahan ditentukan oleh karakteristik proses pengolahan, waktu tinggal hidrolik (HRT), konfigurasi reaktor, serta intensitas penggunaan peralatan mekanikal. Teknologi dengan proses intensif dan densitas reaktor tinggi, seperti MBR atau UASB, umumnya memerlukan area yang lebih kecil. Sebaliknya, teknologi yang mengandalkan volume bak besar atau proses oksidasi konvensional seperti *extended aeration* dan lumpur aktif standar membutuhkan luasan lebih besar.

Tabel 18. Kisaran Kebutuhan Lahan berdasarkan Teknologi IPAL

Unit Teknologi	Kisaran Luas Lahan (m^2 per m^3/hari)	Kategori
Lumpur Aktif		
-Lumpur Aktif Standar	0,12 – 0,25	Sangat Luas
-*Step Aeration*	0,12 – 0,25	Sangat Luas
-*Modified Aeration*	0,12 – 0,25	Luas
-*Contact Stabilization*	0,12 – 0,25	Luas
-*High Rate Aeration*	0,10 – 0,20	Sedang
-*Pure Oxygen Process*	0,05 – 0,12	Sangat Kecil
-*Oxidation Ditch*	0,20 – 0,35	Sangat Luas
-*Extended Aeration*	0,12 – 0,25	Luas
Biofilter Aerob Anaerob	0,10 – 0,15	Kecil
UASB	0,03 – 0,10	Sangat Kecil
ABR	0,10 – 0,20	Sedang
SBR	0,12 – 0,25	Luas
MBR	0,05 – 0,12	Sangat Kecil
MBBR	0,1 – 0,15	Kecil

Kebutuhan lahan berdasarkan tabel referensi internasional umumnya memberikan angka yang lebih kecil dibanding kondisi lapangan. Hal ini karena tabel tersebut hanya mencerminkan *footprint* unit proses utama, tanpa memasukkan kebutuhan ruang utilitas, area servis, panel listrik, blower room, serta jarak aman (*clearance*) sesuai standar operasional dan K3. Dengan demikian, kebutuhan lahan aktual dapat mencapai 1,5–3 kali nilai teoritis, tergantung konfigurasi IPAL dan tata letak bangunan pendukung.

Penilaian kebutuhan lahan dikonversikan ke dalam skoring untuk memudahkan perbandingan antar teknologi IPAL. Skoring dilakukan berdasarkan kisaran luas lahan per satuan kapasitas (m^2 per m^3/hari), yang dikategorikan menjadi lima tingkat. Semakin kecil kebutuhan lahan, semakin tinggi skor yang diberikan. Penilaian ini mempertimbangkan baik estimasi footprint proses dari literatur maupun koreksi kondisi riil di lapangan yang mencakup area utilitas, ruang servis, dan jarak aman. Dengan pendekatan ini, teknologi yang bersifat kompak dan berintensitas proses tinggi akan memperoleh skor lebih tinggi, sedangkan teknologi yang memerlukan reaktor besar atau area luas akan memperoleh skor lebih rendah.

Tabel 19. Skoring Kebutuhan Luas Lahan IPAL

Unit Teknologi	Skor	Kategori
Lumpur Aktif		
-Lumpur Aktif Standar	1	Sangat Luas
-*Step Aeration*	1	Sangat Luas
-*Modified Aeration*	2	Luas
-*Contact Stabilization*	2	Luas
-*High Rate Aeration*	3	Sedang
-*Pure Oxygen Process*	5	Sangat Kecil
-*Oxidation Ditch*	1	Sangat Luas
-*Extended Aeration*	2	Luas
Biofilter Aerob Anaerob	4	Kecil
UASB	5	Sangat Kecil
ABR	3	Sedang
SBR	2	Luas
MBR	5	Sangat Kecil
MBBR	4	Kecil

4.5.4. Analisa Biaya Konstruksi (*Capital Expenditure*/CAPEX)

Biaya konstruksi (CAPEX) merupakan biaya investasi awal yang diperlukan untuk pembangunan instalasi pengolahan air limbah (IPAL), mencakup pekerjaan sipil, mekanikal, elektrikal, serta pengadaan peralatan utama. Besaran CAPEX antar teknologi IPAL bervariasi tergantung pada kompleksitas proses, kebutuhan peralatan, dan luas lahan yang dibutuhkan. Teknologi konvensional dan berbasis proses anaerob umumnya memiliki CAPEX lebih rendah, sedangkan teknologi lanjutan seperti sistem lumpur aktif intensif, biofilm bergerak, dan membran memerlukan investasi awal yang lebih tinggi. Dalam penelitian ini, nilai CAPEX digunakan sebagai indikator perbandingan relatif antar teknologi IPAL berdasarkan studi literatur, bukan sebagai estimasi biaya *detail engineering*. Estimasi biaya konstruksi (CAPEX) dalam penelitian ini dibatasi pada pembangunan unit instalasi pengolahan air limbah (IPAL), yang meliputi pekerjaan sipil, mekanikal, dan elektrikal pada unit-unit pengolahan utama. Estimasi biaya tidak mencakup pembangunan jaringan perpipaan pengumpul dan penyalur, bangunan pendukung, pekerjaan utilitas, pembebasan lahan, serta biaya non-teknis lainnya. Pembatasan ini dilakukan untuk menjaga kesetaraan perbandingan biaya antar teknologi IPAL yang dianalisis.

Tabel 20. Kisaran Biaya Pembangunan (CAPEX) berdasarkan Teknologi IPAL

Unit Teknologi	Kisaran CAPEX (Juta/m^3)	Kategori
Lumpur Aktif		
-Lumpur Aktif Standar	4,5 – 7,5	Menengah
-*Step Aeration*	5,0 – 8,0	Menengah
-*Modified Aeration*	5,0 – 8,0	Menengah
-*Contact Stabilization*	5,0 – 8,0	Menengah
-*High Rate Aeration*	6,5 – 9,0	Menengah
-*Pure Oxygen Process*	10,0 – 15,0	Sangat Tinggi
-*Oxidation Ditch*	5,5 – 9,0	Menengah
-*Extended Aeration*	4,0 – 6,5	Menengah
Biofilter Aerob Anaerob	3,0 – 5,0	Rendah – Menengah
UASB	2,0 – 3,5	Rendah
ABR	2,5 – 4,0	Rendah
SBR	4,5 – 7,0	Menengah
MBR	7,5 – 12,0	Tinggi
MBBR	4,5 – 7,5	Menengah

Kisaran biaya investasi (*CAPEX*) pada berbagai teknologi IPAL menunjukkan variasi yang signifikan, yang terutama dipengaruhi oleh kompleksitas proses, kebutuhan peralatan mekanikal–elektrikal, serta tingkat otomasi sistem. Teknologi sederhana seperti ABR, UASB, dan biofilter *aerob–anaerob* memiliki CAPEX relatif rendah karena konstruksi yang lebih sederhana dan minim komponen khusus. Sebaliknya, teknologi berteknologi tinggi seperti MBR dan *Pure Oxygen Process* memerlukan investasi awal lebih besar akibat kebutuhan membran atau suplai oksigen murni yang meningkatkan biaya instalasi. Secara umum, teknologi lumpur aktif berada pada kelompok biaya menengah dengan variasi tergantung konfigurasi proses. Berdasarkan kisaran biaya pembangunan (*CAPEX*), maka dapat dikonversikan menjadi skoring penilaian untuk memudahkan perbandingan antar teknologi sebagai berikut.

Tabel 21. Skoring Biaya Pembangunan (*CAPEX*)

Unit Teknologi	Skor	Kategori Biaya *CAPEX*
Lumpur Aktif		
-Lumpur Aktif Standar	3	Menengah
-*Step Aeration*	3	Menengah
-*Modified Aeration*	3	Menengah
-*Contact Stabilization*	3	Menengah
-*High Rate Aeration*	2	Tinggi
-*Oxidation Ditch*	3	Menengah
-*Pure Oxygen Process*	1	Sangat Tinggi
-*Extended Aeration*	3	Menengah
Biofilter Aerob Anaerob	4	Rendah
UASB	5	Sangat Rendah
ABR	5	Sangat Rendah
SBR	3	Menengah
MBR	2	Tinggi
MBBR	3	Menengah

4.5.5. Analisa Biaya Operasi (*Operational Expenditure*/OPEX)

Biaya operasi atau *Operational Expenditure (OPEX)* merupakan biaya yang dikeluarkan secara rutin selama pengoperasian instalasi pengolahan air limbah (IPAL), meliputi konsumsi energi listrik, bahan kimia, pengelolaan lumpur, perawatan peralatan, serta kebutuhan tenaga

operator. Besaran OPEX sangat dipengaruhi oleh jenis teknologi yang digunakan, tingkat otomasi sistem, serta kompleksitas proses pengolahan. Teknologi dengan kebutuhan aerasi intensif, sistem bertekanan, dan peralatan canggih cenderung memiliki OPEX yang lebih tinggi dibandingkan teknologi sederhana atau berbasis proses anaerob.

Dalam penelitian ini, estimasi OPEX disajikan dalam bentuk kisaran biaya relatif untuk memudahkan perbandingan antar teknologi IPAL. Estimasi biaya hanya mencakup biaya operasi unit IPAL dan tidak meliputi biaya pengelolaan lanjutan di luar sistem, seperti distribusi efluen, pengolahan lanjutan eksternal, maupun biaya administrasi. Nilai OPEX digunakan sebagai indikator komparatif dan bukan sebagai perhitungan biaya operasi detail, sehingga perbedaan kondisi lokasi dan kebijakan operasional rumah sakit tidak diperhitungkan secara spesifik.

Tabel 22. Kisaran Biaya Operasi (OPEX) berdasarkan Teknologi IPAL

Unit Teknologi	**Kisaran OPEX (Juta/m^3.hari/tahun)**	**Kategori**
Lumpur Aktif		
-Lumpur Aktif Standar	1,8 – 3,0	Menengah
-*Step Aeration*	2,2 – 3,5	Menengah
-*Modified Aeration*	2,0 – 3,3	Menengah
-*Contact Stabilization*	2,0 – 3,3	Menengah
-*High Rate Aeration*	3,0 – 4,5	Menengah - Tinggi
-*Pure Oxygen Process*	4,5 – 6,5	Sangat Tinggi
-*Oxidation Ditch*	2,8 – 4,2	Tinggi
-*Extended Aeration*	2,0 – 3,2	Menengah
Biofilter Aerob Anaerob	1,0 – 1,8	Rendah - Menengah
UASB	0,6 – 1,0	Rendah
ABR	0,7 – 1,2	Rendah
SBR	2,0 – 3,2	Menengah
MBR	3,5 – 5,5	Tinggi
MBBR	2,2 – 3,5	Menengah

Kisaran biaya operasional (OPEX) pada berbagai teknologi IPAL menunjukkan perbedaan yang dipengaruhi oleh kebutuhan aerasi, penggunaan energi, bahan kimia, frekuensi pemeliharaan, dan kompleksitas sistem. Teknologi anaerob seperti UASB dan ABR memiliki OPEX rendah karena tidak memerlukan aerasi dan peralatan mekanis yang intensif.

Sebaliknya, teknologi berintensitas aerasi tinggi seperti *High Rate Aeration*, MBR, dan terutama *Pure Oxygen Process* menunjukkan OPEX lebih besar akibat konsumsi energi yang tinggi dan kebutuhan pemeliharaan komponen khusus. Teknologi lumpur aktif dan SBR berada pada kategori menengah dengan variasi tergantung pola operasi dan stabilitas proses.

Tabel 23. Skala Skoring Biaya Operasional (*OPEX*)

Unit Teknologi	Skor	Kategori Biaya *CAPEX*
Lumpur Aktif		
-Lumpur Aktif Standar	3	Menengah
-*Step Aeration*	3	Menengah
-*Modified Aeration*	3	Menengah
-*Contact Stabilization*	3	Menengah
-*High Rate Aeration*	2	Tinggi
-*Pure Oxygen Process*	1	Sangat Tinggi
-*Oxidation Ditch*	2	Tinggi
-*Extended Aeration*	2	Rendah
Biofilter Aerob Anaerob	4	Rendah
UASB	5	Sangat Rendah
ABR	5	Sangat Rendah
SBR	3	Menengah
MBR	2	Tinggi
MBBR	3	Tinggi

Pola skoring CAPEX dan OPEX pada beberapa teknologi menunjukkan kesamaan karena konfigurasi proses, kebutuhan konstruksi, dan intensitas energi saling berkaitan secara langsung. Teknologi anaerob seperti UASB dan ABR tetap ekonomis pada dua sisi karena minim peralatan dan konsumsi energi. Sebaliknya, teknologi intensif seperti MBR dan *Pure Oxygen Process* memiliki CAPEX dan OPEX tinggi akibat penggunaan membran atau oksigen murni. Variasi yang lebih nyata terlihat pada extended aeration dan MBBR, di mana CAPEX berada pada kategori menengah tetapi OPEX cenderung lebih tinggi akibat kebutuhan aerasi kontinu.

4.5.6. Analisa Kompleksitas Operasional & Pemeliharaan

Kompleksitas operasional digunakan sebagai salah satu parameter utama dalam pemilihan teknologi IPAL rumah sakit karena berkaitan langsung dengan keberlanjutan operasi dan keandalan sistem pengolahan. Penilaian kompleksitas operasional dalam penelitian ini mempertimbangkan tingkat kesulitan pengoperasian, kerentanan sistem terhadap fluktuasi beban, kebutuhan keterampilan sumber daya manusia, intensitas monitoring dan kontrol proses, serta kemampuan sistem dalam merespons kondisi darurat. Teknologi dengan tingkat kompleksitas operasional yang lebih rendah cenderung lebih stabil dan mudah dioperasikan, khususnya pada rumah sakit dengan keterbatasan sumber daya teknis dan personel.

Teknologi berbasis proses sederhana dan robust, seperti *biofilter aerob*, ABR, dan *extended aeration*, menunjukkan tingkat kompleksitas operasional yang relatif rendah karena tidak memerlukan kontrol proses yang intensif serta memiliki toleransi yang baik terhadap variasi beban. Sebaliknya, teknologi dengan tingkat efisiensi tinggi dan sistem tertutup, seperti MBR dan *pure oxygen process*, memiliki kompleksitas operasional yang lebih tinggi akibat kebutuhan monitoring ketat, perawatan peralatan khusus, serta keterampilan operator yang lebih spesifik. Kompleksitas operasional menjadi faktor penting yang harus dipertimbangkan bersamaan dengan efisiensi pengolahan, kebutuhan lahan, serta biaya investasi dan operasi dalam menentukan teknologi IPAL yang paling sesuai untuk masing-masing tipe rumah sakit.

Tabel 24. Penilaian Kompleksitas Operasional dan Pemeliharaan IPAL

Teknologi IPAL	Tingkat Kesulitan Operasi	Kerentanan Sistem	Kebutuhan SDM	Monitoring & Kontrol	Tanggap Darurat	Kompleksitas Operasional
Lumpur Aktif Standar	Sedang	Sedang	Menengah	Aerasi & lumpur	Sedang	+++
Extended Aeration	Rendah	Rendah	Dasar	Aerasi sederhana	Rendah	++++
Step Aeration	Sedang	Rendah	Menengah	Kontrol aliran	Sedang	+++
Modified Aeration	Sedang	Sedang	Menengah	Kontrol energi	Sedang	+++
Contact Stabilization	Sedang	Sedang	Menengah	Kontrol lumpur	Sedang	+++
High Rate Aeration	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Aerasi intensif	Tinggi	++

Teknologi IPAL	Tingkat Kesulitan Operasi	Kerentanan Sistem	Kebutuhan SDM	Monitoring & Kontrol	Tanggap Darurat	Kompleksitas Operasional
Oxidation Ditch	Tinggi	Sedang	Menengah	Kontrol DO (rotor)	Sedang	++
Pure Oxygen Process	Sangat tinggi	Tinggi	Sangat tinggi	Sistem O_2	Sangat tinggi	+
Biofilter Aerob	Rendah	Rendah	Dasar	Minimal	Rendah	++++
Biofilter Anaerob	Rendah	Sedang	Dasar	Minimal	Sedang	+++
UASB	Sedang	Sedang	Menengah	*Gas & sludge*	Sedang	+++
ABR	Rendah	Rendah	Dasar	Minimal	Rendah	++++
SBR	Sedang	Sedang	Menengah	Siklus otomatis	Sedang	+++
MBR	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Membran & CIP	Tinggi	++
MBBR	Sedang	Rendah	Menengah	Aerasi	Rendah	++++

Keterangan:

+ (sangat rendah); ++ (rendah); +++ (sedang); ++++ (tinggi)

Penilaian kompleksitas operasional dilakukan untuk menentukan tingkat kemudahan pengoperasian tiap teknologi berdasarkan kesulitan proses, kerentanan sistem, kebutuhan SDM, serta intensitas monitoring. Teknologi yang prosesnya sederhana dan stabil memperoleh skor lebih tinggi, sedangkan teknologi yang membutuhkan aerasi intensif, kontrol otomatis, atau sistem tekanan tinggi memperoleh skor lebih rendah.

Tabel 25. Skala Skoring Biaya Operasional (*OPEX*)

Unit Teknologi	Skor	Kompleksitas
Lumpur Aktif		
-Lumpur Aktif Standar	4	Mudah
-*Step Aeration*	5	Sangat Mudah
-*Modified Aeration*	4	Mudah
-*Contact Stabilization*	4	Mudah
-*High Rate Aeration*	4	Mudah
-*Pure Oxygen Process*	3	Moderat
-*Oxidation Ditch*	3	Moderat
-*Extended Aeration*	2	Kompleks

Unit Teknologi	Skor	Kompleksitas
Biofilter Aerob Anaerob	5	Sangat Mudah
UASB	4	Mudah
ABR	5	Sangat Mudah
SBR	4	Mudah
MBR	3	Moderat
MBBR	5	Sangat Mudah

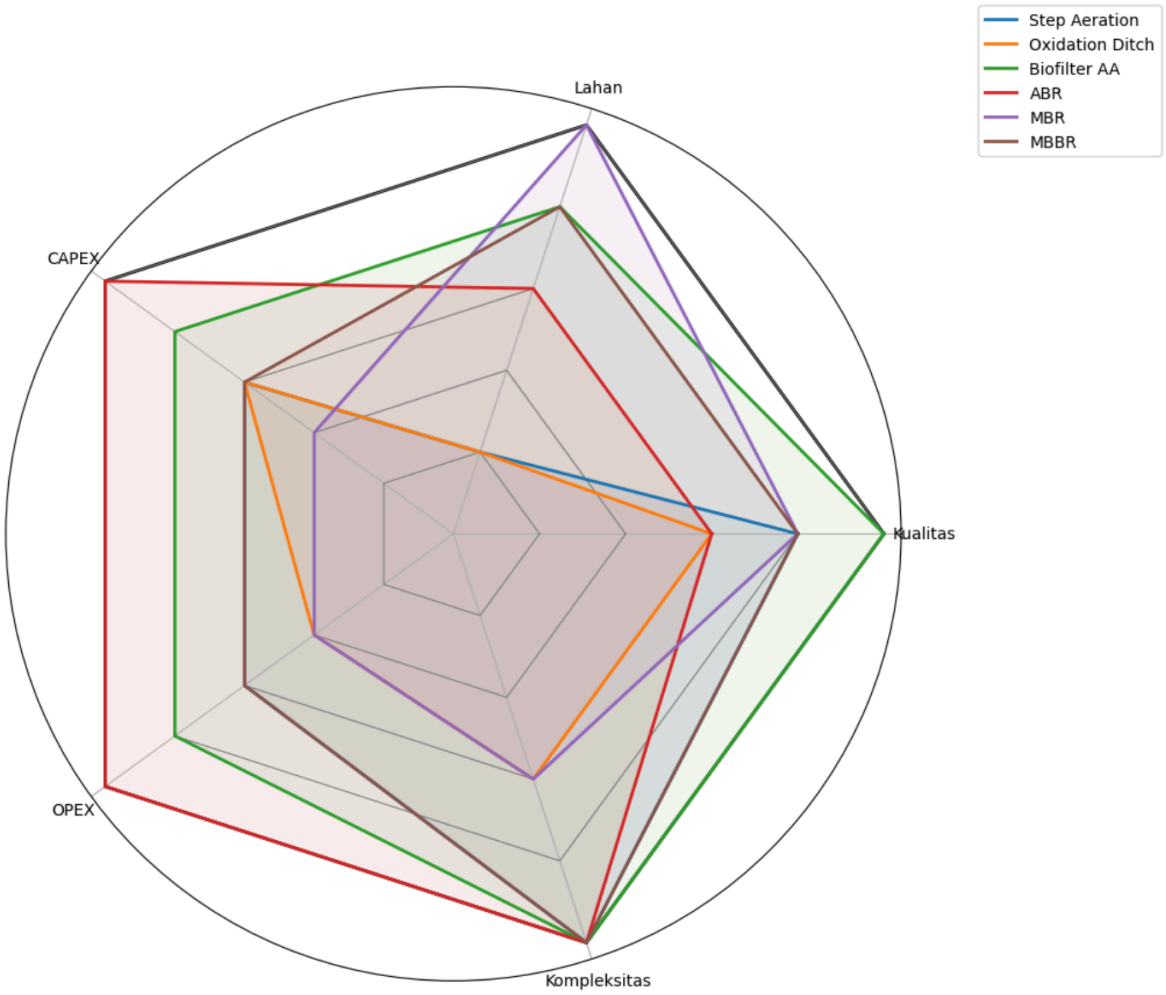
4.5.7. Alternatif Teknologi IPAL Rumah Sakit

Analisa efisiensi removal dilakukan menggunakan data referensi yang menguraikan masing-masing teknologi IPAL yang dilakukan penilaian akhir berdasarkan kualitas pengolahan (efisiensi removal), kebutuhan lahan, biaya pembangunan (CAPEX), biaya operasional (OPEX), dan kompleksitas operasional dan pemeliharaan terhadap kesesuaian teknologi IPAL terpilih berdasarkan beban pengolahan sebagai berikut.

Tabel 26. Alternatif Pemilihan Teknologi IPAL

Unit Teknologi	Skoring				
	Kualitas Pengolahan	Kebutuhan Lahan	CAPEX	OPEX	Kompleksitas
Lumpur Aktif					
-Step Aeration	4	1	3	3	5
-*Oxidation Ditch*	3	1	3	2	3
Biofilter Aerob Anaerob	5	4	4	4	5
ABR	3	3	5	5	5
MBR	4	5	2	2	3
MBBR	4	4	3	3	5

Dalam pendekatan pemilihan teknologi IPAL, setiap teknologi terpilih berdasarkan beban pengolahan, kemudian dievaluasi berdasarkan parameter kualitas pengolahan (efisiensi removal), kebutuhan lahan, CAPEX, OPEX, dan kompleksitas operasional & pemeliharaan. Dalam menghasilkan keputusan akhir yang objektif, dilakukan penilaian dengan *weighted scoring* (pembobotan) dengan 3 (tiga) skenario yang diuraikan sebagai berikut.



Gambar 30. Grafik Radar Alternatif Pemilihan Teknologi IPAL Rumah Sakit

Skenario 1 – Prioritas Kualitas Pengolahan

Dalam skenario ini, pemilihan teknologi IPAL berfokus pada kemampuan unit proses dalam mencapai efisiensi pengolahan terbaik untuk parameter kritis seperti BOD, COD, TSS, amonia, dan indikator mikrobiologis. Pendekatan ini relevan untuk rumah sakit yang menghasilkan limbah dengan karakteristik lebih kompleks atau berada di lokasi sensitif secara lingkungan, sehingga menuntut kualitas efluen di atas standar minimum. Kriteria kualitas diberi bobot terbesar karena menjadi determinan utama keberhasilan sistem dalam meminimalkan risiko kontaminasi ekologis dan dampak kesehatan masyarakat. Teknologi diprioritaskan berdasarkan performa biologis dan stabilitas operasional terhadap fluktuasi beban organik.

Tabel 27. Skoring Prioritas Kualitas Pengolahan

Unit Teknologi	Skoring					Nilai Akhir
	Kualitas Pengolahan (40%)	Kebutuhan Lahan (20%)	CAPEX (15%)	OPEX (15%)	O & M (10%)	
Lumpur Aktif						
-Step Aeration	1,60	0,20	0,45	0,45	0,50	3,20
-*Oxidation Ditch*	1,20	0,20	0,45	0,30	0,30	2,45
Biofilter Aerob Anaerob	2,00	0,80	0,60	0,60	0,50	4,50
ABR	1,20	0,60	0,75	0,75	0,50	3,80
MBR	1,60	1,00	0,30	0,30	0,30	3,50
MBBR	1,60	0,80	0,45	0,45	0,50	3,80

Berdasarkan skoring kualitas pengolahan, maka urutan pemilihan teknologi IPAL yang digunakan yaitu *Biofilter Aerob Anaerob*, MBBR atau ABR, MBR, *Step Aeration*, dan *Oxidation Ditch*.

Skenario 2 – Prioritas Keterbatasan Lahan

Skenario ini diterapkan pada rumah sakit yang memiliki keterbatasan ruang, terutama pada kawasan perkotaan atau bangunan bertingkat di mana luas lahan efektif sangat terbatas. Oleh karena itu, parameter kebutuhan lahan diberi bobot dominan sebagai dasar penilaian, sementara faktor-faktor lain seperti biaya dan kemudahan operasional menjadi pertimbangan sekunder. Pendekatan ini menilai teknologi berdasarkan efisiensi *footprint* dan kemampuan integrasi sistem yang lebih kompak namun tetap memenuhi baku mutu. Skenario ini penting untuk mendukung perencanaan IPAL yang realistis terhadap kondisi fisik tapak tanpa mengorbankan kinerja pengolahan secara signifikan.

Tabel 28. Skoring Prioritas Luas Lahan

Unit Teknologi	Skoring					Nilai Akhir
	Kualitas Pengolahan (20%)	Kebutuhan Lahan (40%)	CAPEX (15%)	OPEX (15%)	O & M (10%)	
Lumpur Aktif						
-Step Aeration	0,80	0,40	0,45	0,45	0,50	2,60
-*Oxidation Ditch*	0,60	0,40	0,45	0,30	0,30	2,05

Unit Teknologi	Skoring					Nilai Akhir
	Kualitas Pengolahan (20%)	Kebutuhan Lahan (40%)	CAPEX (15%)	OPEX (15%)	O & M (10%)	
Biofilter Aerob Anaerob	1,00	1,60	0,60	0,60	0,50	4,30
ABR	0,60	1,20	0,75	0,75	0,50	3,80
MBR	0,80	2,00	0,30	0,30	0,30	3,70
MBBR	0,80	1,60	0,45	0,45	0,50	3,80

Berdasarkan skoring luas lahan, maka urutan pemilihan teknologi IPAL yang digunakan yaitu *Biofilter Aerob Anaerob*, MBBR atau ABR, MBR, *Step Aeration*, dan *Oxidation Ditch*.

Skenario 3 – Prioritas Biaya

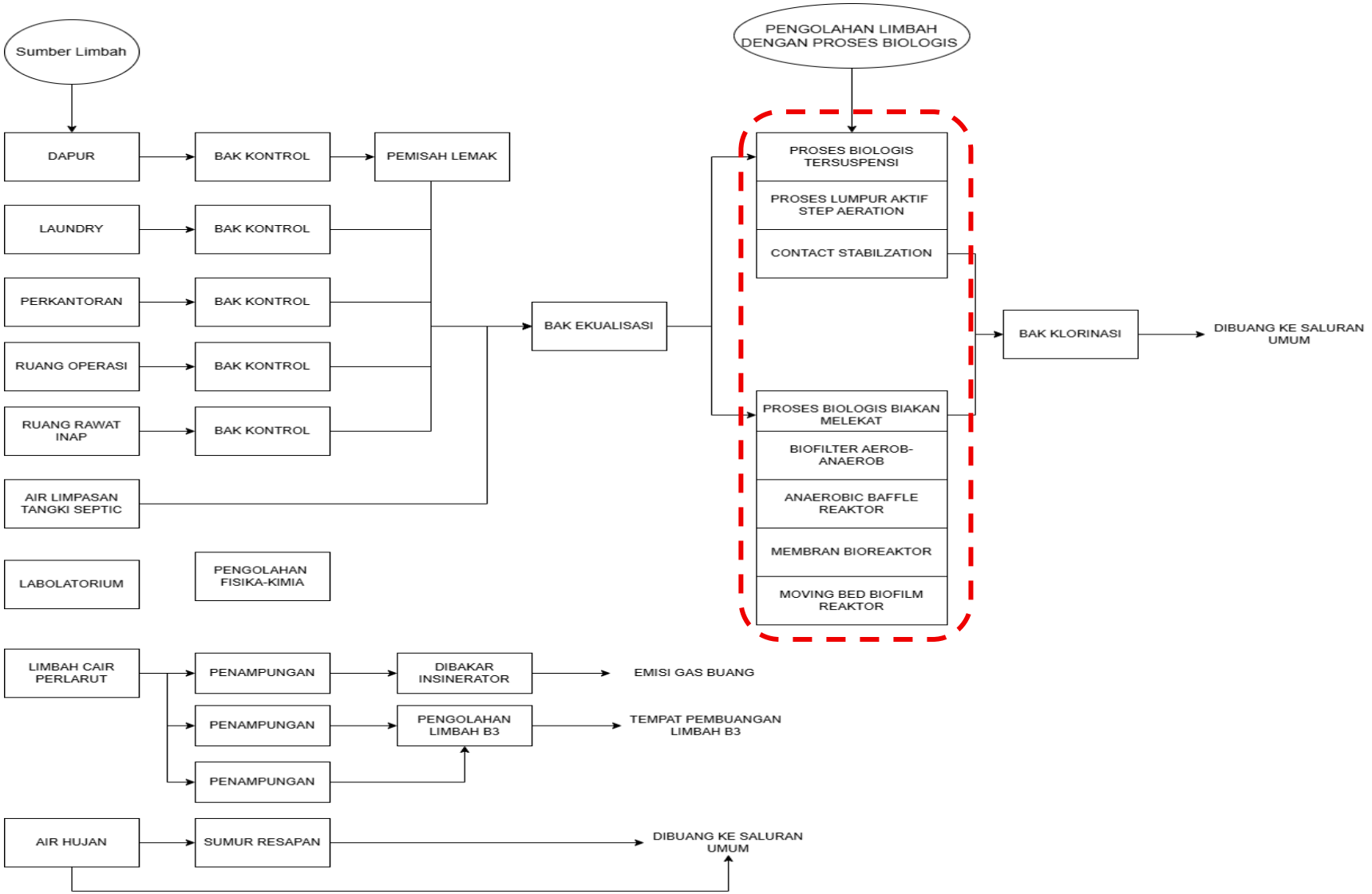
Skenario ekonomi menitikberatkan pada efisiensi biaya investasi awal (CAPEX) dan biaya operasional tahunan (OPEX), sehingga cocok diterapkan pada rumah sakit tipe C dan D atau fasilitas yang memiliki keterbatasan anggaran. Evaluasi difokuskan pada biaya konstruksi reaktor, peralatan mekanikal-elektrikal, kebutuhan energi, serta intensitas pemeliharaan. Dalam skenario ini, teknologi dengan biaya investasi rendah namun tetap andal dalam pengolahan menjadi pilihan utama, sementara teknologi berbiaya tinggi diklasifikasikan sebagai opsi alternatif. Pendekatan ini memastikan keberlanjutan operasional dalam jangka panjang dan meminimalkan risiko kegagalan akibat beban biaya yang tidak proporsional terhadap kapasitas pelayanan rumah sakit.

Tabel 29. Skoring Prioritas Biaya

Unit Teknologi	Skoring					Nilai Akhir
	Kualitas Pengolahan (15%)	Kebutuhan Lahan (15%)	CAPEX (35%)	OPEX (25%)	O & M (10%)	
Lumpur Aktif						
-Step Aeration	0,60	0,15	1,05	0,75	0,50	3,05
-*Oxidation Ditch*	0,45	0,15	1,05	0,50	0,30	2,45
Biofilter Aerob Anaerob	0,75	0,60	1,40	1,00	0,50	4,30
ABR	0,45	0,45	1,75	1,25	0,50	4,40

Unit Teknologi	Skoring					Nilai Akhir
	Kualitas Pengolahan (15%)	Kebutuhan Lahan (15%)	CAPEX (35%)	OPEX (25%)	O & M (10%)	
MBR	0,60	0,75	0,70	0,50	0,30	2,85
MBBR	0,60	0,60	1,05	0,75	0,50	3,50

Berdasarkan skoring luas lahan, maka urutan pemilihan teknologi IPAL yang digunakan yaitu ABR, *Biofilter Aerob Anaerob*, MBBR, *Step Aeration*, dan *Oxidation Ditch*.



Gambar 31. Skematik Teknologi IPAL Rumah Sakit

BAB V
KESIMPULAN

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan dalam penelitian Tinjauan Karakteristik dan Alternatif Teknologi Pengolahan Air Limbah berdasarkan Tipe Rumah Sakit di Indonesia dapat diuraikan sebagai berikut.

1. Karakteristik Air Limbah
   - Air limbah rumah sakit di semua tipe menunjukkan pH yang stabil dan konsentrasi parameter pencemar yang umumnya rendah, indikasi adanya penggunaan *pre-treatment*. Namun, rumah sakit tipe C menunjukkan kadar BOD dan COD yang lebih tinggi akibat keterbatasan fasilitas pengolahan meski melayani kapasitas besar. Secara keseluruhan, kualitas air limbah masih dalam rentang hasil penelitian sebelumnya, namun optimalisasi pengolahan lanjutan di IPAL tetap diperlukan untuk meningkatkan efisiensi, terutama pada rumah sakit dengan fasilitas terbatas.
   - Rasio BOD/COD air limbah rumah sakit yang berada pada kisaran 0,3–0,5 menunjukkan bahwa karakteristik air limbah tersebut masih dalam kondisi moderat dan sebagian besar kandungan bahan organiknya dapat diolah secara biologis, meskipun terdapat potensi keberadaan senyawa yang sulit terurai seperti obat-obatan dan bahan medis yang perlu mendapat perhatian lebih dalam proses pengolahan.
   - Secara keseluruhan, kinerja IPAL di empat rumah sakit sudah efektif dalam menurunkan BOD, COD, dan TSS, namun masih ditemukan variasi efisiensi pada beberapa parameter seperti MBAS, Fenol, dan NH3-N yang memerlukan peningkatan pengelolaan lebih lanjut.

2. Alternatif Teknologi Pengolahan
   - Jika ditinjau dari prioritas kualitas pengolahan, maka urutan prioritas teknologi IPAL meliputi *Biofilter Aerob Anaerob*, MBBR atau ABR, MBR, *Step Aeration*, dan *Oxidation Ditch*.
   - Jika ditinjau dari prioritas luas lahan, maka urutan prioritas teknologi IPAL meliputi *Biofilter Aerob Anaerob*, MBBR atau ABR, MBR, *Step Aeration*, dan *Oxidation Ditch*.

- Jika ditinjau dari prioritas biaya, maka urutan prioritas teknologi IPAL meliputi ABR, *Biofilter Aerob Anaerob*, MBBR, *Step Aeration*, dan *Oxidation Ditch*.

4.2 Saran

1. Rumah sakit perlu memastikan pemilihan teknologi IPAL mempertimbangkan beban pencemar spesifik, seperti rasio BOD/COD yang moderat dan potensi keberadaan senyawa sulit terurai (obat-obatan dan bahan kimia medis). Teknologi biologis tetap relevan, namun perlu dilengkapi sistem pendukung untuk senyawa non-*biodegradable*.
2. Disarankan menambahkan unit *pre-treatment* (seperti *grease trap*, koagulasi-flokulasi atau ekualisasi) untuk mengurangi beban parameter seperti TSS, MBAS, dan Fenol, serta memastikan unit desinfeksi (klorinasi atau teknologi serupa) diterapkan untuk menurunkan kadar Total Coliform sebelum efluen dibuang ke lingkungan.
3. Setiap rumah sakit perlu melakukan evaluasi berkala terhadap debit aktual dan beban pencemar limbah cair yang dihasilkan. Hal ini penting untuk memastikan kapasitas dan teknologi IPAL yang digunakan tetap sesuai, serta mengantisipasi potensi peningkatan jumlah pasien atau perubahan pola pelayanan di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

Abubaker, H. T. (2024). *Descriptive Statistics*. IntechOpen.

Adeniyi, A. O., & Jimoh, M. (2024). Decontamination Potential of Ultraviolet Type C Radiation in Water Treatment Systems: Targeting Microbial Inactivation. *Water*, 16 (19), 2725.

Adityosulindro, S., Phitamara, A., Astuti, S. K. (2022). Asesmen Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah Rumah Sakit XYZ. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*. Vol. 15, No. 2.

Alim, M. S., Noor, R. (2022). Efisiensi Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) dengan Sistem Conventional Activated Sludge Termodifikasi Attached Growth Media di IPAL RSUD Ulin. *Jurnal Ilmu dan Aplikasi Teknik*. Vol. 7, No. 1.

Al-Rekabi, W. S., Al-khafaji, S. A., & Janna, H. (2022). Impact of dissolved oxygen on hospital wastewater quality treated by SBBR in Basrah city, Iraq. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 14–25.

Agustina, T., Rudijanto, H. I. W. (2022). Studi Instalasi Pengolahan Air Limbah di RSUD dr. R Goetoeng Taroenadibrata Purbalingga Tahun 2015. *Buleting Keslingmas*. 35 (1); 69-71

Arthur, P. M. A., Konate, Y., Sawadogo, B., Sagoe, G., Dwumfour-Asare, B., Ahmed, I., & Williams, M. N. V. (2022). Performance evaluation of a full-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor coupled with trickling filters for municipal wastewater treatment in a developing country. *Heliyon*, 8(8).

Busyairi, M., Dewi Y. P., & Widodo, D. I. (2016). Efektivitas Kaporit pada Proses Klorinasi terhadap Penurunan Bakteri Coliform dari Limbah Cair Rumah Sakit X Samarinda. *Journal of Manusia dan Lingkungan*, Vol. 23 No. 2.

Chanh, N. D. Q., Bing, L., Quang, T. V., Terashima, M., Goel, R., & Yasui, H. (2016). Dynamic Simulation of Trickling Filter Process with Hydraulic Stress Tests. *Journal of Water and Environment Technology*, *14*(5), 398–410.

Carrasquero, S., Rodriguez, J., & Díaz-Montiel, A. R. (2025). Sequencing Batch Reactor: A Sustainable Wastewater Treatment Option for the Canned Vegetable Industry. *Sustainability*, *17*(3), 818.

Custodio, M., Cuadrado-Campó, W., Peñaloza, R., Vicuña-Orihuela, C., Torres-Gutiérrez, E., & Orellana, E. (2022). Treatment of Hospital Wastewater Using Activated Sludge with Extended Aeration. *Journal of Ecological Engineering*, *23*(11), 24–32.

Davis, J. (2023). *Introduction to Environmental Data Science*.

Dewi, I. U., Azizah, R., Husnina, Z., Sumantri, A., Qomariah, N., Suhariono, S., Jauharoh, S. N. A., & Latif, M. (2022). Effectiveness of Wastewater Treatment Installation and Liquid Waste Quality in Dr. Soetomo General Hospital, Surabaya. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*. 14(1), 45–54.

Derakhshesh, S., Abdollhzadeh Sharghi, E., & Bonakdarpour, B. (2024). *Enhancing synthesis wastewater treatment efficiency and anaerobic sludge characteristics through integration of electrocoagulation process with up-flow anaerobic sludge blanket reactor*.

Eid, A., El-Sayed, A.-E., Ayoub, M. R., & El-Morsy, A. (2024). *Optimizing the MBBR System and Integrating Nanoparticles to Improve Wastewater Treatment Efficiency*.

Fatimazahra, S., Latifa, M., Laila, S., Monsif, K. (2023). Review of hospital effluents: special emphasis on characterization, impact, and treatment of pollutants and antibiotic resistance. *Environmental Monitoring Assessment*. Vol. 19, No. 3, P. 393

Fernández-López, C., González García, M., & Sánchez-Lozano, J. M. (2021). Analysis of WWTPs technologies based on the removal efficiency of Pharmaceutical Activated Compounds for water reuse purposes. A Fuzzy Multi-Criteria Decision Making approach. *Journal of Water Process Engineering*, *42*

Firoozi, M., Hashemi, M., Narooie, M. R., & Daraei, H. (2023). Evaluation of phenol degradation rate using advanced oxidation/reduction process (AO/RP) in the presence of sulfite and zinc oxide under UV. *Optik*, *279*, 170787.

Gafil, Z. M., Tameemi, H. M. A., Obaid, A. A. 2023. Treatment of hospital wastewater by oxidation using potassium ferrate: Systematic review. *AIP Conference Proceedings*. 27874.

Geetha, B., & Sujatha, N. (2024). *An Overview of Descriptive Analytics and Data Visualization*. 1158–1163.

Golbabaei Kootenaei, F., & Amini Rad, H. (2013). Treatment of Hospital Wastewater by Novel Nano-Filtration Membrane Bioreactor (NF-MBR). *Iranica Journal of Energy and Environment*, *4*(1), 60–67.

Hayati, N. (2023). Efektivitas biofilter kombinasi anaerob-aerob pada pengolahan limbah cair rumah sakit. *Jurnal Ilmiah Lingkungan*, *1*(01), 9–17.

Hernaningsih, T. (2014). Aplikasi membrane bioreactor (MBR) untuk proses daur ulang air limbah. *Jurnal Air Indonesia*, *Vol. 7 No. 2.*

Honarmandrad, Z., Javid, N., & Malakootian, M. (2021). Removal efficiency of phenol by ozonation process with calcium peroxide from aqueous solutions. *Applied Water Science*, *11*(2), 1–9.

Julkowska, M. M. (2024). Data insights: Descriptive data papers with high information impact are a new gold mine for readers of plant, cell and environment. *Plant Cell and Environment*.

Kalamu, D. M., Timpua, T. K., Kawatu, Y. T. (2014). Kualitas Air Limbah Rumah Sakit Jiwa Prof. Dr. L. V. Ratumbuysang. Politeknik Kesehatan Kementerian Kesehatan; Manado

Karungamye, P. N., Rugaika, A. M., Mtei, K. A., & Machunda, R. (2023). Physicochemical and microbiological characterization and of hospital wastewater in Tanzania. *Total Environment Research Themes*.

Khadir, A., Mollahosseini, A., Negarestani, M., & Mardy, A. (2020). *Anaerobic Biotechnology for the Treatment of Pharmaceutical Compounds and Hospital Wastewaters* (pp. 61–84). Springer

Khan, N. A., El Morabet, R., Khan, R. A., Ahmed, S., Dhingra, A., Khan, A. R., & Adam, F. A. (2020). *Comparative Study of Treatment and Performance in Membrane Bioreactor*

and Sequencing Batch Reactor for Hospital Wastewater in Smart Cities (pp. 23–28). Springer, Singapore.

Kumar, K. A., Shrivastava, S., Tabassum, A., Roy, S., Raikwar, R., Katare, I., Kumar, S. A., & Sharma, S. (2023). Optimization for Removal of COD and BOD through RSM-CCD by Activated Sludge Treatment Process for Pharmaceutical Wastewater. *Journal of Environmental Nanotechnology*.

Listiyono, R. A. (2015). *Studi Deskriptif tentang Kualitas Pelayanan di Rumah Sakit Umum Dr. Wahidin Sudiro Husodo Kota Mojoketro Pasca menjadi Rumah Sakit Tipe B*. Jurnal Kebijakan dan Manajemen Publik. Vol. 1, No. 1.

Mackuľak, T., Cverenkárová, K., Vojs Staňová, A., Fehér, M., Tamáš, M., Škulcová, A., Gál, M., Naumowicz, M., Špalková, V., & Birošová, L. (2021). Hospital Wastewater-Source of Specific Micropollutants, Antibiotic-Resistant Microorganisms, Viruses, and Their Elimination. *The Journal of Antibiotics*, *10*(9), 1070.

Maddah, H. A. (2022). Predicting Optimum Dilution Factors for BOD Sampling and Desired Dissolved Oxygen for Controlling Organic Contamination in Various Wastewaters. *International Journal of Chemical Engineering*, *2022*, 1–14.

Mahdi, F. K., Abualhail, S., & Dawood, A. S. (2022). Performance of the anaerobic baffled reactor for primary treatment of rural domestic wastewater in Iraq. *Open Engineering*, *12*(1), 859–865.

Majumder, A., Gupta, A. K., Ghosal, P. S., Varma, M. (2021). A review on hospital wastewater treatment: A special emphasis on occurrence and removal of pharmaceutically active compounds, resistant microorganisms, and SARS-CoV-2. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol. 9, Issue 2

Malakootian, M., Dehghanzadeh Reyhani, R., Sattarvand, S., & Loloei, M. (2015). The Effectiveness of Ozone Disinfection and Advanced Oxidation (H2O2 + O3) on the Elimination of Coliform Bacteria from Hospital Raw Sewage. *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences*, *14*(8), 679–690.

Pharmawati, K., Salman, G. R. (2024) Evaluasi Pengolahan Air Limbah Rumah Sakit X. *Serambi Engineering Journals*. Vol. 9, No. 1

Patel, R. S. (2012). *Statistical Techniques for Data Analysis*. LAP LAMBERT Academic Publishing.

Pérez-Bou, L., Masegosa, A. R., Vargas, R. V., Link, A., Martinex, A. G., Lopez, J. G., Palazon, B. M. (2024). Treatment of hospital wastewater using aerobic granular sludge technology: Removal performance and microbial dynamics. *Journal of Water Process Engineering*. Vol. 60

Rudaru, D. G., Lucaciu, I., & Fulgheci, A. M. (2022). *Correlation between BOD5 and COD – biodegradability indicator of wastewater*. *4*(2), 80–86.

Said, N. I., Hernaningsih, T., Widayat, W., Yudo, S., Septian, A., Setiyono, S., Rifai, A., Setiadi, I., Sulaeman, O., Wahyono, H. D., Hartaja, D. R. K., Darmawangsa, M. R., & Ikhsan, I. N. (2024). *Domestic wastewater treatment with anaerobic-aerobic biofilters using plastic honeycomb media*. *1388*,

Sallis, J., Gripsrud, G., Olsson, U. H., & Silkoset, R. (2021). *Simple Analysis Techniques* (pp. 111–146). Springer, Cham.

Scarim, G., LaMartina, E. L., Venkiteshwaran, K., Zitomer, D., Newton, R. J., & McNamara, P. J. (2023). An inexpensive, reproducible method to quantify activated sludge foaming potential: Validation through lab-scale studies and year-long full-scale sampling campaign. *Water Environment Research*, *95*(4).

Severson, M. A., Onanong, S., Dolezal, A., Bartelt-Hunt, S. L., Snow, D. D., & McFadden, L. M. (2023). Analysis of Wastewater Samples to Explore Community Substance Use in the United States: Pilot Correlative and Machine Learning Study. *JMIR Formative Research*, *7.*

Sharma, R., Sharma, R., Verma, N., Lugani, Y., Kumar, S., & Asadnia, M. (2021). *Conventional and advanced techniques of wastewater monitoring and treatment* (pp. 1–48). Elsevier.

Shokohi, R., Yari, K., & Sedighi Hemat, M. (2018). Investigating the performance of moving bed or biofilmreactor in the removal of oil and grease from besathospital wastewater. *Journal of Industrial Pollution Control*, *34*(1), 1991–1997.

Tan, C. H., & Rashid, N. A. (2023). *Characteristics Of Effluent Wastewater In Hospital (In Literature Review)*.

Ullah, N., Sheikh, Z., Ahmad, O., & Khan, S. J. (2024). Performance Evaluation of Sponge Anaerobic Baffled Reactor for Municipal Wastewater Treatment. *Sustainability*, *16*(21), 9398.

Verlicchi, P. (2018). Hospital Wastewaters Characteristics, Management, Treatment, and Environmental Risks. *Springer International Publishing*

Xu, R.-Z., Cao, J., Fang, F., Feng, Q., Yang, E., & Luo, J. (2021). Integrated data-driven strategy to optimize the processes configuration for full-scale wastewater treatment plant predesign. *Science of The Total Environment*, *785*, 147356.

Zwain, H. M., Vakili, M., Faris, A. M., & Dahlan, I. (2019). *Modeling the Fate of Phenol in Moving Bed Biofilm Reactor Sewage Treatment Plant* (pp. 1643–1653). Springer, Cham.

Yani, M., Rahmawati, P., & Pos, K. (2013). Penghilangan bau amonia menggunakan teknik biofilter dengan bahan pengisi koral dan arang aktif yang diinokulasi dengan bakteri pengoksidasi amonia. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*. Vol. 23 No. 1.

Yenti, S. (2011). *Evaluasi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Rumah Sakit (Studi Kasus: Rumah Sakit St. Carolus Jakarta)*. Universitas Indonesia

Yuniarto, M. L. N. A. (2024). Kajian penerapan metode advanced oxidation process (AOPS) pada Pengolahan Limbah Cair di Indonesia. *Jurnal Purifikasi*, . Vol. 23 No. 2.

Yuwati, S. (2021). Asesmen Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah Rumah Sakit XYZ. *Prosiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal ke-9 Tahun 2021*

Winarti, C. (2020). Penurunan Bakteri Total Coliform pada Air Limbah Rumah Sakit terhadap Pengaruh Lama Waktu Penyinaran dengan Sinar Ultra Violet. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, . Vol. 20 No. 1, page 52-57