



Sistem Pengolahan Air Limbah *Hybrid* (Koagulasi, *Moving Bed Biofilm Reactor*, Elektrokoagulasi dan Ultrafiltrasi) dalam Pemenuhan Baku Mutu Air Limbah Industri *Farmasi* Berbasis Non-Beta-Laktamase

Rachmad Ardhianto^{1,2*}, Hadiyanto^{1,3}, Ferry Hermawan^{1,4}

¹Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Diponegoro,

²Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, ITPLN, Jakarta, 11750

³Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,

⁴Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

*Corresponding author: rachmad@itpln.ac.id

(Received: January 6, 2025; Accepted: February 3, 2025)

Abstract

Hybrid Wastewater Treatment System (Coagulation, Moving Bed Biofilm Reactor, Electrocoagulation and Ultrafiltration) in Fulfilling Non-Beta-Lactamase Based Pharmaceutical Industrial Wastewater Quality Standards. Pharmaceutical wastewater is one of the wastewaters included in the category of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs). The wastewater produced is from the activity of the drug manufacturing production process. One important aspect in determining the pharmaceutical wastewater treatment process is determining the treatment process based on the BOD/COD value. The BOD/COD value of pharmaceutical wastewater has a value of <0.3 so that a pre-treatment process is needed. In this study, a hybrid treatment system (coagulation, MBBR, EC and ultrafiltration) was used as a wastewater treatment process with the target quality standards of Governor Regulation Number 69 of 2013. The pre-treatment process in this system is divided into two functions, namely the pre-treatment function for the biological process and the pre-treatment for the ultrafiltration process. The efficiency of this hybrid system is 96.85% TSS, 97.49% COD, 97.53% BOD, 89.63% nitrogen and 92.83% phenol. The results of the application of this hybrid technology produce processing output results that meet the standardized quality standards.

Keywords: hybrid system, pre-treatment, coagulation, MBBR, electrocoagulation, ultrafiltration

Abstrak

Air limbah farmasi merupakan salah satu air limbah yang masuk dalam kategori *pharmaceuticals and personal care products* (PPCPs). Air limbah yang dihasilkan merupakan dari aktivitas proses produksi pembuatan obat. Satu aspek penting dalam penentuan proses pengolahan air limbah farmasi adalah menentukan proses pengolahan yang didasari dari nilai BOD/COD. Nilai BOD/COD air limbah farmasi mempunyai nilai <0.3 sehingga diperlukan suatu proses *pre-treatment*. Dalam studi ini sistem pengolahan *hybrid* (koagulasi, MBBR, EC dan ultrafiltrasi) digunakan sebagai proses pengolahan air limbah dengan target baku mutu Peraturan Gubernur Nomor 69 Tahun 2013. Proses *pre-treatment* dalam sistem ini dibagi menjadi dua fungsi, yaitu fungsi *pre-treatment* untuk proses biologis dan *pre-treatment* untuk proses ultrafiltrasi. Efisiensi dari sistem *hybrid* ini adalah sebesar 96,85% TSS, 97,49% COD, 97,53% BOD, 89,63% nitrogen dan 92,83% feenol. Hasil aplikasi teknologi *hybrid* ini menghasilkan hasil keluaran pengolahan yang sesuai baku mutu yang distandarkan.

Kata kunci: *hybrid sistem, pre-treatment, koagulasi, MBBR, elektrokoagulasi, ultrafiltrasi*

How to Cite This Article: Ardhianto, R., Hadiyanto, H. & Hermawan, F. (2025). Sistem Pengolahan Air Limbah Hybrid (Koagulasi, Moving Bed Biofilm Reactor, Elektrokoagulasi dan Ultrafiltrasi) dalam Pemenuhan Baku Mutu Air Limbah Industri Farmasi Berbasis Non-Beta-Laktamase. *JPII*, 2(6), 379-387. DOI: <https://doi.org/10.14710/jpii.2024.25119>

PENDAHULUAN

Air limbah farmasi merupakan salah satu jenis limbah yang masuk dalam kategori *pharmaceuticals and personal care products* (PPCPs). Air limbah jenis ini merupakan jenis air limbah yang mempunyai nilai karakteristik yang cenderung *recalcitrant*. Kondisi ini merupakan akibat dari proses industri farmasi yang merupakan penghasil produk dari proses pengembangan obat dan formulasi. Hal ini didukung karena rasio nilai BOD/COD yang rendah, dengan ditandai nilai BOD yang rendah dan tingginya nilai COD. Seperti hasil kajian dari Li & Li (2015) dan Guo et al. (2017) yang melaporkan bahwa nilai BOD air limbah farmasi dalam rentang 500-2500 mg/L dan 1000-10.000 mg/L untuk rentang parameter COD. Oleh karena itu, diperlukan suatu proses terintegrasi yang dapat mengatasi karakteristik air limbah tersebut.

Air limbah industri farmasi XYZ merupakan air limbah dari aktivitas produksi produk farmasi berupa non-beta-laktamase. Secara eksisting, industri ini sudah dilengkapi dengan instalasi pengolahan air limbah dengan pendekatan teknologi pengolahan biologis. Namun secara performa, keluaran pengolahan dari proses biologis tersebut masih belum memenuhi standar hasil yang ditetapkan. Berdasarkan karakteristik air limbah yang dihasilkan selama proses produksi, air limbah yang dihasilkan mengandung kandungan COD, BOD, TSS, amonia, fenol dan kandungan antibiotik. Nilai COD dan BOD yang dihasilkan dari aktivitas produksi produk farmasi adalah sebesar 2156 mg/L dan 643 mg/L. Jenis limbah farmasi mempunyai rasio nilai kandungan BOD/COD yang kecil. Secara eksisting, industri ini mempunyai nilai BOD/COD dengan rasio 0,298 di mana nilai ini menunjukkan nilai rasio *biodegradable* yang sangat rendah, sehingga proses pengolahan tidak dapat mengedepankan proses biologis sebagai proses utama. Sehingga proses fisik-kimia sangat tepat digunakan sebagai *pre-treatment* untuk meningkatkan rasio nilai BOD/COD. Hal ini sesuai dengan Akmehtmet Balcioglu & Otker (2003) dan Adishkumar et al. (2012) yang menjelaskan bahwa rasio nilai BOD/COD air limbah farmasi tergolong dalam kategori rendah yaitu 0,077 dan 0,015. Penelitian lain menginformasikan bahwa air limbah yang mengandung *phenols* dan *aromatic hydrocarbon* dan *long chain alkanes* sangat sulit diolah dengan pendekatan proses *biochemical* (Huang et al., 2021; Xu et al., 2021).

Dengan karakteristik di atas, diperlukan suatu pendekatan pengolahan yang dapat memfasilitasi proses

pengolahan air limbah industri yang mempunyai rasio BOD/COD rendah. Aplikasi teknologi kimia seperti koagulasi merupakan salah satu proses yang dapat digunakan untuk meningkatkan nilai BOD/COD. Berdasarkan Hu et al. (2022), teknologi koagulasi yang dikombinasikan dengan proses adsorpsi dapat meningkatkan nilai BOD/COD yaitu 0,3-0,75. Selain itu, berdasarkan Ardhianto & Bagastyo (2019) teknologi elektrokimia merupakan salah satu alternatif dalam meningkatkan nilai BOD/COD khususnya air limbah industri yang masuk dalam kategori *pharmaceuticals and personal care products* (PPCPs). Proses biologis dapat dilakukan setelah proses pengolahan kimia ataupun elektrokimia. Hal ini dikarenakan proses biologis berbasis teknologi konvensional tidak kompatibel terhadap fluktuatif karakteristik air limbah. Seperti yang telah dilaporkan oleh Singh et al. (2024), teknologi konvensional tidak memadai dalam pengolahan air limbah berbasis farmasi.

Berdasarkan penjelasan di atas, kombinasi proses pengolahan antara fisik, kimia dan proses biologis dapat dilakukan dalam pengolahan air limbah industri farmasi. Untuk proses pemenuhan baku mutu pengolahan air limbah industri ini, dikedepankan proses kimia yaitu koagulasi sebagai proses *pre-treatment* proses biologis, proses biologis yang digunakan adalah proses biologis berbasis *moving bed biofilm reactor* dengan menggunakan surface area $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Tujuan dari proses ini adalah untuk menghilangkan kandungan organik berupa amonia secara oksidasi langsung. Selain itu, untuk menghemat keterbatasan area instalasi pengolahan air limbah, keluaran *moving bed biofilm reactor* dilakukan proses secara langsung dengan pendekatan teknologi elektrokimia yaitu proses elektrokoagulasi. Proses ini sangat baik dalam mereduksi TSS, BOD, COD dan logam berat. Oktiawan et al. (2020) melaporkan bahwa teknologi elektrokoagulasi dapat digunakan untuk mereduksi kandungan COD dan TSS pada air lindi. Selain itu, aplikasi *full-scale* teknologi ini juga sudah diterapkan dalam proses pengolahan air limbah yang mengandung logam berat dan dapat mereduksi operasional sebesar 48% dan mereduksi kandungan lumpur sebesar 50% yang mana telah dilaporkan oleh Ardhianto et al. (2024). Dengan kombinasi proses kimia-biologis dan elektrokimia diharapkan dapat mereduksi kontaminasi yang ada di air limbah industri farmasi ini dan dapat mengurangi jumlah kandungan lumpur yang dihasilkan.

Untuk memaksimalkan proses kimia-biologis dan elektrokimia, proses *post-treatment* digunakan untuk finalisasi. Proses ini mengedepankan teknologi adsorpsi dengan menggunakan media karbon aktif ioden 800 mg/g dan didukung dengan proses ultrafiltrasi dengan ukuran filter sebesar 0,01 micron dan dilengkapi oleh sistem ultraviolet untuk mereduksi parameter *total coliform* dari air limbah. Pada penelitian ini dikedepankan proses pengolahan air limbah industri farmasi berbasis non-beta-laktamase dengan pendekatan proses kimia koagulasi, proses biologis berbasis MBBR, proses elektrokimia berbasis elektrokoagulasi dan proses *post-treatment* yang menggunakan adsorpsi dan ultrafiltrasi dalam satu paket sistem pengolahan dengan kapasitas 2 m³/jam yang dioperasikan selama 8 jam dalam satu hari. Proses ini mengedepankan tahapan pemantauan proses *commissioning* dan proses pemantauan bulanan untuk melihat keefektifan sistem pengolahan.

METODE PENELITIAN

Tahapan proses optimalisasi IPAL eksisting industri XYZ dimulai dengan tahapan survei dan analisis karakteristik, serta evaluasi kondisi IPAL eksisting. Pada tahapan survei, pengujian karakteristik dilakukan dengan menganalisis air limbah masukan di titik ekualisasi. Air limbah yang dihasilkan secara kateistik dapat dilihat pada Tabel 1. Tahapan selanjutnya adalah melakukan kajian optimalisasi dengan pendekatan *Basic Engineering Design (BED)* berdasarkan nilai karakteristik yang dihasilkan industri. Proses pelaksanaan optimaliasi pengolahan air limbah dilakukan secara dua tahap. Tahap pertama adalah tahapan proses *commissioning system* dilakukan selama 1 bulan. Dalam proses pelaksanaan *commissioning*, pendataan dilakukan di masing-masing unit proses dengan melakukan pendataan parameter nilai COD, BOD, TSS sebagai pijakan dalam menentukan sistem dapat digunakan secara operasional seluruhnya. Proses *commissioning* difungsikan untuk pendataan terkait performa sistem. Pendataan dilakukan pada hari ke-7, 14, 21 dan 28. Selanjutnya proses pemantauan ketika beroperasi seluruhnya dilakukan selama 3 bulan dengan pendataan hasil keluaran setiap 1 bulan proses.

Tabel 1. Karakteristik air limbah terukur

No	Parameter	Hasil	Satuan
1	pH	6.88	-
2	BOD	643.00	mg/L
3	COD	2156.00	mg/L
4	TSS	557.00	mg/L
5	FOG	<1.4	mg/L
6	Amonia	80.15	mg/L
7	Total <i>Colliform</i>	320000.00	MPN/100 ml

Performa dari proses penyisihan COD, BOD dan TSS dari sistem yang digunakan dianalisis menggunakan pendekatan nilai efisiensi *removal* dengan persamaan (1).

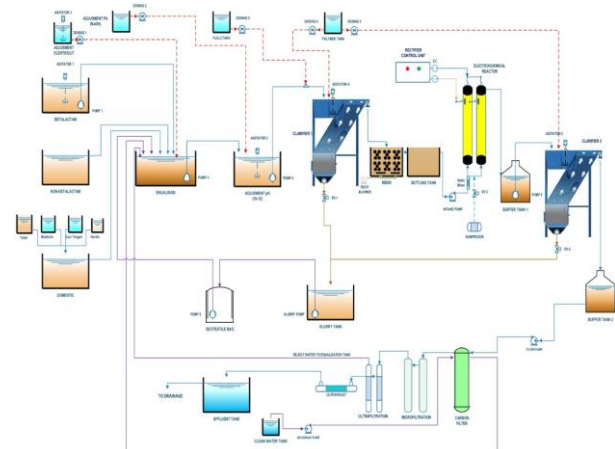
$$R (\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

Nilai R menunjukkan nilai efisiensi yang dihasilkan dari masing-masing unit proses. C₀ adalah inisial konsentrasi sebelum masuk ke unit proses dalam satuan (mg/L) dan C_t adalah konsentrasi COD, BOD dan TSS keluaran dari masing-masing proses dalam satuan (mg/L). Hasil pengujian setiap sesinya akan dilakukan pendekatan performa efisiensi sehingga dapat memberikan gambaran pada saat proses *commissioning* dan proses aktual aplikasi secara keseluruhan. Pengujian nilai COD dan TSS selama proses *commissioning* dilakukan dengan metode unit HACH DR 900. Metode yang digunakan yaitu 8000 USEPA1 *Reactor Digestion Method* untuk parameter COD. Sementara untuk parameter TSS dilakukan dengan pendekatan metode 8006 yaitu pendekatan *Photometric Method*. Untuk parameter BOD₅ dilakukan dengan berkolaborasi dengan laboratorium eksternal. Pada fase pemantauan setelah proses *commissioning* dilakukan dengan berkolaborasi dengan laboratorium eksternal yang terkreditasi KAN.

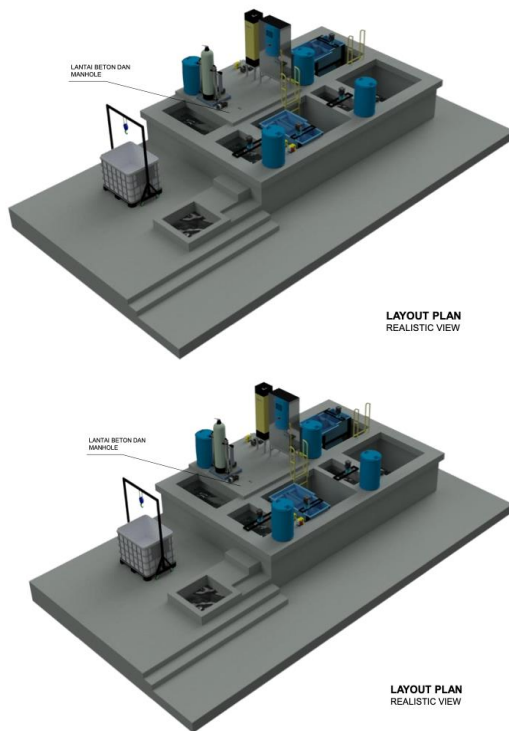
HASIL DAN PEMBAHASAN

1. *Basic Engineering Design*

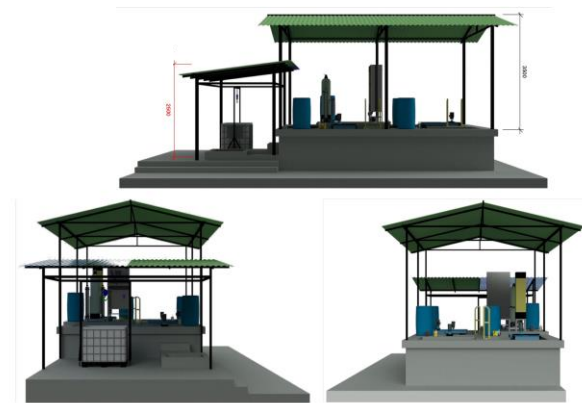
Basic Engineering Design (BED) dilakukan berdasarkan pendekatan nilai BOD/COD dalam penentuan sistem teknoogi yang digunakan. Dalam *Basic Engineering Design (BED)* ditentukan proses kimia-biologis-elektrokimia dan proses *post-treatment* seperti yang disajikan pada Gambar 1, 2 dan 3. Teknologi yang digunakan harus mempunyai kemudahan terhadap nilai operasional yang optimum dan kemudahan akan akses mengoperasikan teknologi.



Gambar 1. Flow diagram proses optimalisasi WWTP



Gambar 2. *Layout* profil WWTP setelah optimalisasi



Gambar 3. Tampak profil WWTP setelah optimalisasi

Hasil desain dari proses *Basic Engineering Design* (BED) yang diaplikasikan di tahap optimalisasi WWTP adalah sebagai berikut ini.

- 1) Tangki Beta-laktamase
 Fungsi : sebagai penampungan limbah beta-laktamase
 Bahan : beton
 Dimensi : $1000 \times 1000 \times 1500$ mm
 Volume : $1,5 \text{ m}^3$
- 2) Tangki Ekualisasi
 Fungsi : untuk menampung air limbah dari proses non-beta-laktamase dan limbah domestik
 Bahan : beton

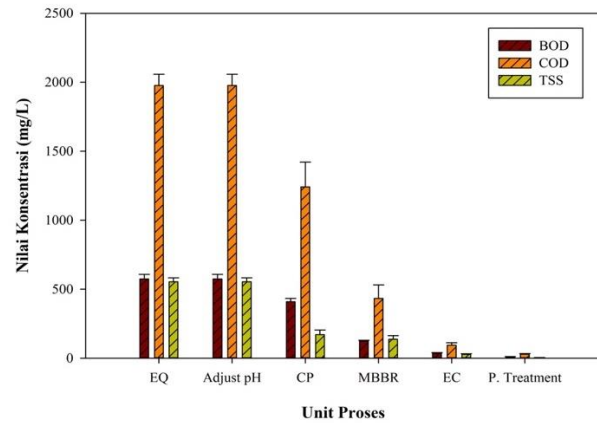
- Dimensi : $1900 \times 1900 \times 3300$ mm
 Volume : $11,9 \text{ m}^3$
- 3) Tangki *Adjustment* pH
 Fungsi : sebagai *adjustment* pH menjadi pH alkali untuk menjadi dasar pondasi proses *chemical* presipitasi
 Bahan : beton
 Dimensi : $700 \times 1900 \times 2500$ mm
 Kapasitas : $3,325 \text{ m}^3$
Dosing pump : 6-10 L/jam (NaOH)
Dosing pump : 6-10 L/jam (elektrolit)
 - 4) *Clarifier* 1
 Fungsi : sebagai tangki proses presipitasi kimia dan proses pengendapan
 Bahan : *stainless steel*
 Kapasitas : $10 \text{ m}^3/\text{hari}$ ($2 \text{ m}^3/\text{jam}$)
Dosing pump : 6-10 L/jam (koagulan)
Dosing pump : 1-5 L/jam (polimer)
 - 5) Tangki MBBR
 Fungsi : sebagai tempat proses biologis, proses ini menggunakan bak eksisting
 Bahan : beton
 Dimensi : $700 \times 1900 \times 2500$ mm
 Kapasitas : $3,325 \text{ m}^3$
Blower udara : $1 \text{ m}^3/\text{menit}$
 Jumlah difuser : 8 buah (10 inch)
 Jenis nutrisi : Microbelift IND (USA)
 Jumlah media : $1,2 \text{ m}^3$ (40%)
 SLAR : 6 gram BOD/ m^2 .hari
 - 6) Elektrokoagulasi Tubular
 Fungsi : sebagai tempat proses elektrolisis
 Model : Ecotirtan Type H
 Dimensi : $350 \times 350 \times 2000$ mm
 Kapasitas : 2 MPH Max
Config of electrode : Fe Anode/Al Cathode
Cathode : MRHS configuration
Rectifier unit : 60 Volt/200A
 - 7) *Clarifier* II
 Fungsi : sebagai tangki proses presipitasi kimia dan proses pengendapan
 Bahan : *stainless steel*
 Kapasitas : $10 \text{ m}^3/\text{hari}$ ($2 \text{ m}^3/\text{jam}$)
 - 8) *Post-treatment*
 Fungsi : sebagai final proses sebelum dibuang ke lingkungan
 Kapasitas : $1,25 \text{ m}^3/\text{jam}$
 Tekanan : 1,0-3,0 Bar
 Daya : 0,35 kWh
 Mikrofiltrasi : Catridge PE220
 Unit ultrafiltrasi : Type 4040 (SS304)
 Dimensi pori : 0,01 Micron
2. *Commissioning test*
Commissioning test adalah salah satu fase yang harus dilakukan pada proses operasional pengolahan air

limbah. Pada fase ini, semua unit baik instrumen yang berhubungan dengan mekanis dan non-mekanis diuji secara layak fungsinya. Pada tahap ini, air limbah dipompakan secara bertahap dan disesuaikan dengan beban olah dimana 7 hari merupakan beban olah 25%, 14 hari (50%), 21 hari (75%) dan 28 hari adalah (100%). Selain menguji instrumentasi, proses ini juga digunakan sebagai tahapan pengujian kualitas keluaran masing-masing teknologi unit proses yang digunakan. Tabel 2 menjelaskan evaluasi proses *commissioning* terhadap penggunaan dosis kimia, dosis nutrisi MBBR, dan dosis aplikasi nilai arus yang digunakan dalam unit elektrokoagulasi.

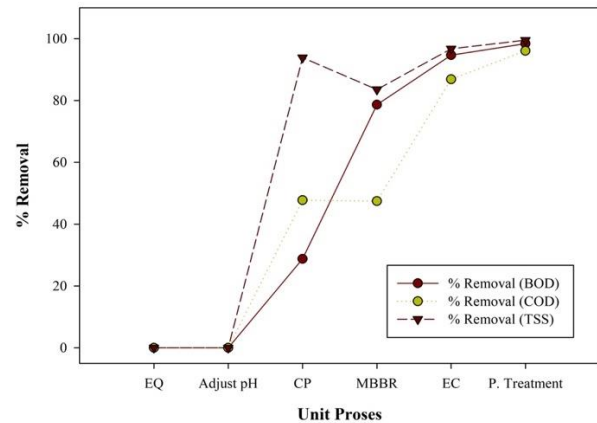
Tabel 2. Dosis terukur selama proses *commissioning*

No	Dosis	Hasil	Satuan
1	Elektrolit	50	kg/bulan
2	NaOH	0.2	kg/hari
3	FeCl ₃	1.92	L/hari
4	Nutrisi <i>commissioning</i>	100	ml/L
5	Nutrisi (<i>running</i>)	50	ml/L
6	Arus kerja	150	Ampere

Dalam proses *commissioning* MBBR, dilakukan tahapan proses yang terdiri dari proses *seeding* selama 3 × 24 jam dengan pemberian dosis bakteri *microbe lift IND* 100 ml/L selama 3 hari berturut-turut dan 50 ml/L setelah kondisi stabil. Bakteri ini merupakan konsorsium *micro-organisme* yang terdiri dari konsorsium aerobik, anaerob, fakultatif, kemo-sintetik dan foto-sintetik. Jenis bakteri ini merupakan jenis bakteri dengan spektrum dewasa. Pada tahap berikutnya berupa aklimatisasi dilakukan selama 7 hari dengan melakukan pengecekan nilai DO dan ORP air limbah untuk memastikan proses yang terjadi. Pada saat aklimatisasi proses MBBR, *root blower* yang digunakan mempunyai kapasitas 1 m³/menit. Nilai ORP tercatat selama proses ini dalam rentang 50-250 mV yang mana menunjukkan proses *phosporus removal*, degradasi BOD dan nitrifikasi. Selama proses *commissioning*, pemantauan secara kualitas dilakukan secara berkala. Pengujian perfoma dilakukan sebanyak 4 (empat) kali proses yaitu dihari ke 7, 14, 21 dan 28 hari. Adapun hasil yang didapatkan selama proses *commissioning* secara rata-rata tersajikan pada Gambar 4 dan 5.



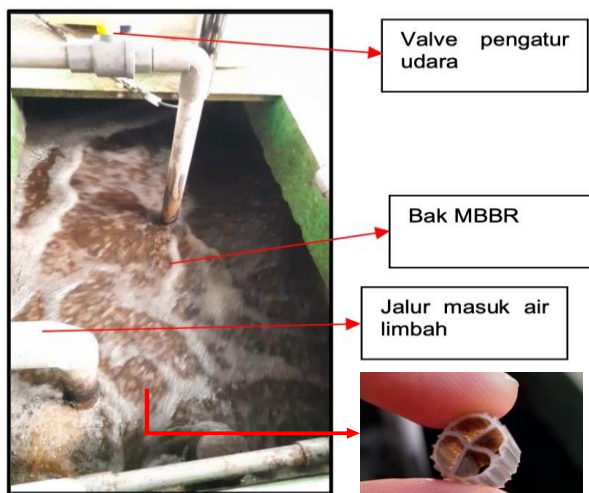
Gambar 4. Nilai konsentasi selama proses *commissioning* air limbah industri XYZ



Gambar 5. Nilai %removal setiap unit proses pengolahan air limbah industri XYZ

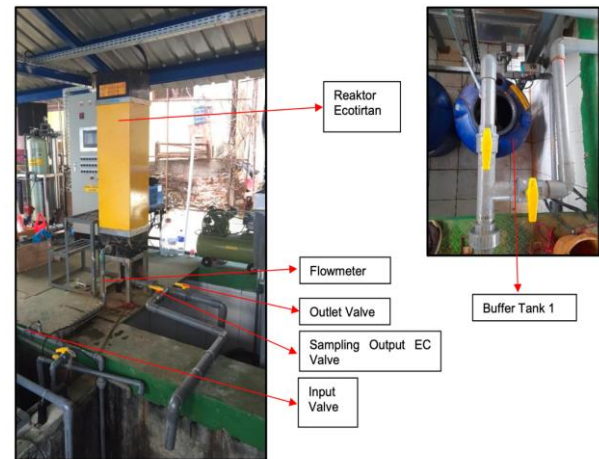
Berdasarkan Gambar 4, nilai masukan air limbah yang dihasilkan di bak ekualisasi mempunyai rata-rata 574,79±33,21 mg/L, 1976,61±81,42 mg/L dan 554,08±28,29 mg/L untuk paramater BOD, COD dan TSS. Nilai penyisihan pada proses kimia sebagai proses *pre-treatment* memberikan hasil keluaran pengolahan BOD, COD dan TSS sebesar 409,54±23,66 mg/L, 1241,46±180,09 mg/L dan 171,06±33,87 mg/L, atau menghasilkan efisiensi sebesar 28,75%, 47,75% dan 93,86% untuk paramater tersebut. Untuk proses pengolahan biologis memberikan nilai efisiensi rata-rata sebesar 78,62% BOD, 47,44% COD dan 83,54% TSS dari masukan proses kimia koagulan. Tingginya efisiensi BOD pada proses biologis sesuai dengan prinsip proses oksidasi lanjut dari sistem MBBR yang digunakan. Pada proses MBBR digunakan media sebagai tempat hidup bakteri melalui pembentukan biofilm di permukaan media. Selama proses aklimatisasi proses, biofilm terbentuk merata di permukaan media, seperti yang disajikan pada Gambar 6. Berdasarkan kemampuan beban *loading-rate* media MBBR yang digunakan, pada proses ini media MBBR dengan luas area 800 m²/m³

dapat mengelola beban organik BOD sebesar 519,44 gram BOD/hari, atau dengan 1,2 m³ media yang digunakan dapat mengelola beban sebesar 0,43 kg BOD/m³.hari atau sebesar 0,54 g BOD/m².hari. Selain itu, berdasarkan nilai beban COD terhadap kemampuan media didapatkan hasil proses sebesar 1,97 kg BOD/m³.hari atau sebesar 2,47 g BOD/m².hari. Hasil ini identik dengan beberapa penelitian terdahulu yang menyebutkan bahwa kemampuan beban media MBBR dalam rentang hingga 3,2 kg COD/ m³.hari (Bassin et al., 2016). Hasil ini memberikan informasi bahwa pendekatan desain beban organik di proses MBBR yaitu 6 g BOD/m².hari masih masuk dalam kategori aman secara proses pengolahan.



Gambar 6. MBBR unit pada saat proses *commissioning*

Proses elektrokoagulasi pada Gambar 7 sangat berpengaruh terhadap penyisihan parameter BOD, COD dan TSS. Secara umum proses ini membantu menghilangkan parameter tersebut sebesar 94,65%, 86,86% dan 96,70% dari pendekatan masukan nilai ekualisasi. Proses elektrokoagulasi secara proses berhasil menurunkan 70,89% untuk parameter BOD, 78,36% untuk parameter COD dan 80% untuk parameter TSS. Hasil keluaran proses elektrokoagulasi memudahkan proses akhir yaitu *post-treatment* untuk menghasilkan efisiensi keluaran yang optimum. Karena proses elektrokoagulasi pada prinsipnya adalah proses *pre-treatment* yang digunakan untuk melunakan (*softener*) air secara elektrolisis sebelum air dilakukan proses penyaringan ataupun proses *ultrafiltrasi*. Proses elektrokoagulasi akan memberikan hasil berupa *floc* yang terseparasi dengan air seperti yang disajikan pada Gambar 8. *Floc* tersebut akan dipisahkan melalui unit *clarifier* dengan prinsip gravitasi pengendapan. Hasil aplikasi proses elektrokoagulasi ini identik dari penelitian terdahulu yaitu proses yang dapat memberikan efisiensi diatas 70% terhadap parameter TSS, BOD dan COD (Bote, 2021;Chen et al., 2021).

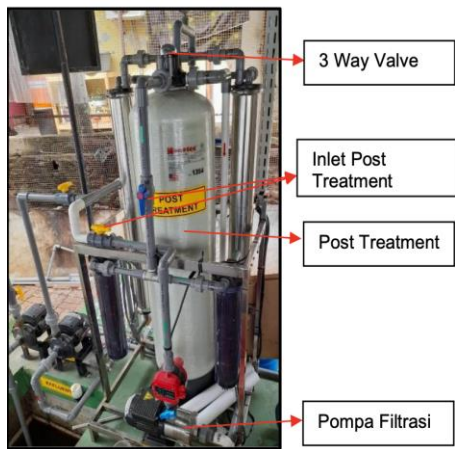


Gambar 7. Unit EC pada saat proses *commissioning*



Gambar 8. Hasil operasional WWTP pada proses *commissioning* air limbah industri XYZ

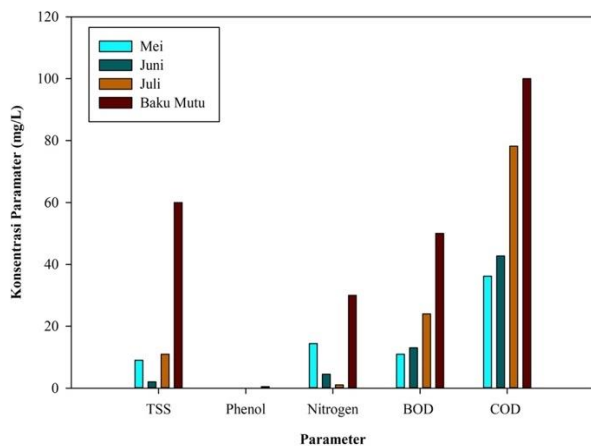
Pada tahap final, proses *post-treatment* seperti yang disajikan pada Gambar 9, digunakan untuk menyaring proses pengolahan dari proses elektrokoagulasi. Proses ini menggunakan rangkaian sistem *pressure filter* karbon aktif dan unit *ultrafiltrasi*. Proses ini dapat menyisihkan air kontaminasi BOD, COD dan TSS di atas 60% untuk COD, 25,03% untuk BOD dan 23.27% untuk parameter TSS. Untuk parameter TSS dan BOD menghasilkan efisiensi yang relatif kecil, karena pada proses ini nilai parameter input tergolong rendah akibat dari proses elektrokoagulasi, sehingga proses ini hanya sebagai final proses.



Gambar 9. Unit *post-treatment* WWTP pada proses *Commissioning*

3. *Full scale operation*

Pada proses *full scale operation*, air limbah secara kontinyu diproses melewati sistem WWTP dengan beban olah 100%. Pemantauan yang dilakukan adalah pengujian masukan air limbah dan keluaran air olahan setiap bulannya selama 3 bulan berturut-turut yang difungsikan untuk mengukur kehandalan sistem WWTP. Pada Gambar 10 menjelaskan hasil selama proses 3 bulan operasional WWTP.



Gambar 10. Performa WWTP pada proses *full scale operation*

Pada Gambar 10, nilai efisiensi yang dihasilkan dari sistem WWTP di pabrik XYZ menunjukkan nilai efisiensi diatas 80%. Untuk paramater TSS, COD, BOD, nitrogen dan fenol dapat dihasilkan pada titik efluen sebesar $7,33 \pm 4,73$ mg/L, $52,37 \pm 22,61$ mg/L, $16,00 \pm 7,0$ mg/L, $6,64 \pm 6,96$ mg/L dan $0,06 \pm 0,06$ mg/L. Hasil proses integrasi ini menunjukkan bahwa sistem kombinasi dengan proses kimia-biologis-elektrokimia dan fisika dapat digunakan sebagai teknologi pengelolaan air limbah farmasi kategori non-beta-laktamase. Secara

visual, air yang dihasilkan pada keluaran pembuangan adalah *clear* visual seperti yang disajikan pada Gambar 11. Proses integrasi ini memberikan hasil yang cukup baik dalam mengolah air limbah jenis farmasi.



EQUALISASI



COAGULATION



MBBR



UF



EC

Gambar 11. Visual hasil integrasi proses pengolahan air limbah selama *full scale operation*

Sistem WWTP yang dikombinasikan identik dengan hasil riset yang sudah dilaporkan oleh peneliti terdahulu. Kombinasi proses pengolahan adalah suatu kaidah yang tidak bisa dihindari untuk menghasilkan air hasil olahan yang baik dari segi kualitas maupun segi visual air buangan. Tabel 3 menjelaskan hasil studi aplikasi kombinasi teknologi kimia, biologis, elektrokimia dan fisika di air limbah farmasi dengan teknologi yang identik pada aplikasi air limbah lainnya.

Tabel 3. Perbandingan efisiensi unit proses pada pengolahan air limbah

Sumber	Teknologi	Paramater/target
Air limbah domestik (Kängsepp et al., 2019)	MBBR-CC-discfilter	COD in: 290 mg/L COD out: 10 mg/L
Air limbah tekontaminasi logam (Ozbey Unal et al., 2019)	EC-UF	Removal Zink: 99%
Air baku (Jebur et al., 2023)	EC-UF-membran dan kristalisasi	Air produksi
Air limbah <i>textile</i> (Shin et al., 2006)	MBBR-CC	Removal COD: 90% Removal Color: 97%
Air Limbah : Air limbah minyak nabati (Akarsu et al., 2022)	EC-Lumpur aktif	Removal COD: 99.9% Removal Color: 93%
Studi ini (air limbah farmasi)	CC-MBBR-EC-UF	Removal COD: 97.49% Removal BOD: 97.53% Removal TSS: 98.65% Removal Nitrogen : 89.63% Removal Phenol : 92.83% Removal Total Organik : 80.48%

4. Nilai operasional pengolahan air limbah PT XYZ

Pada proses pengolahan air limbah ini, dihasilkan suatu kesimpulan penggunaan biaya operasional. Biaya operasional tersebut meliputi biaya kimia, nutrisi bakteri dan biaya pengelolaan lumpur ke pihak ke-3. Adapun nilai biaya operasional yang dihasilkan adalah sebagai berikut ini.

Biaya konsumsi NaOH	: Rp450.000/bulan
Biaya konsumsi FeCl ₃	: Rp3.120.000/bulan
Biaya konsumsi Anode Al	: Rp650.000/bulan
Biaya konsumsi Nutrisi	: Rp750.000/bulan
Biaya konsumsi polimer	: Rp125.000/bulan
Biaya elektrolit	: Rp450.000/bulan
Biaya sludge	: Rp1.500.000/bulan

Biaya yang dihasilkan adalah Rp7.045.000/bulan atau sebesar Rp23.483,33/m³. Hasil ini tentunya belum termasuk biaya pergantian media filter yang digunakan.

KESIMPULAN

Dari studi kasus *hybrid* sistem dalam pengolahan air limbah *farmasi* yang menggunakan proses kimia koagulasi, *moving bed biofilm reactor* (MBBR), elektrokoagulasi dan ultrafiltrasi memberikan hasil pengolahan yang dapat memenuhi baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah dalam hal ini baku mutu yang digunakan adalah Peraturan Gubernur DKI No. 69 Tahun 2013. Sistem *hybrid* yang digunakan berhasil menyisihkan kandungan paramater TSS 96,85%, COD 97,49%, BOD 97,53%, nitrogen 89,63%, fenol 92,83% dan total organik sebesar 80,48%. Pada proses ini, aspek *pre-treatment* menjadi aspek penting dalam proses pengolahan air limbah. Proses *pre-treatment* dalam sistem ini dibagi menjadi dua fungsi, yaitu fungsi *pre-treatment* untuk proses biologis yaitu mengedepankan teknologi koagulasi kimia sementara untuk *pre-treatment* dari fungsi ultrafiltrasi yaitu menggunakan sistem elektrokoagulasi. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa sistem yang dibangun dan dioperasikan sangat kompatibel dengan target baku mutu yang ditetapkan. Penerapan K3L dalam kelistrikan menjadi salah satu kunci dalam mengelola bahaya dalam proses pengolahan air limbah. Untuk perkembangan teknologi proses pengolahan air limbah, pengembangan *micro-organisme* diperlukan untuk mengetahui jenis dan kultur bakteri yang digunakan dalam proses MBBR. Selain itu, pengembangan sistem operasional yang terintegrasi dengan IOT diperlukan untuk memudahkan operasional WWTP.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada PT Ecoatec Patirtan Esacipta selaku penyedia teknologi yang telah memberikan informasi data secara terbuka terkait proses integrasi pengolahan air limbah farmasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adishkumar, S., Sivajothi, S., & Rajesh Banu, J. (2012). Coupled solar photo-fenton process with aerobic sequential batch reactor for treatment of pharmaceutical wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 48(1–3), 89–95.
- Akarsu, C., Bilici, Z., & Dizge, N. (2022). Treatment of vegetable oil wastewater by a conventional activated sludge process coupled with electrocoagulation process. *Water Environment Research : A Research Publication of the Water Environment Federation*, 94(2).
- Akmehmet Balcioğlu, I., & Otker, M. (2003). Treatment of pharmaceutical wastewater containing antibiotics by O₃ and O₃/H₂O₂ processes. *Chemosphere*, 50(1), 85–95.
- Ardhianto, R., Anggrainy, A. D., Samudro, G., Triyawan, A., & Bagastyo, A. Y. (2024). A study of continuous-flow electrocoagulation process to

- minimize chemicals dosing in the full-scale treatment of plastic plating industry wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 60, 105217.
- Ardhianto, R., & Bagastyo, A. Y. (2019). Personal Care Wastewater Treatment With Electro-coagulation and Electro-oxidation. *E3S Web Conf.*, 125.
- Bassin, J. P., Dias, I. N., Cao, S. M. S., Senra, E., Laranjeira, Y., & Dezotti, M. (2016). Effect of increasing organic loading rates on the performance of moving-bed biofilm reactors filled with different support media: Assessing the activity of suspended and attached biomass fractions. *Process Safety and Environmental Protection*, 100, 131–141.
- Bote, M. E. (2021). Studies on electrode combination for COD removal from domestic wastewater using electrocoagulation. *Heliyon*, 7(12).
- Chen, R.-F., Wu, L., Zhong, H.-T., Liu, C.-X., Qiao, W., & Wei, C.-H. (2021). Evaluation of electrocoagulation process for high-strength swine wastewater pretreatment. *Separation and Purification Technology*, 272, 118900.
- Guo, Y., Qi, P. S., & Liu, Y. Z. (2017). A Review on Advanced Treatment of Pharmaceutical Wastewater. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 63(1), 0–6.
- Hu, R., Liu, Y., Zhu, G., Chen, C., Hantoko, D., & Yan, M. (2022). COD removal of wastewater from hydrothermal carbonization of food waste: Using coagulation combined activated carbon adsorption. *Journal of Water Process Engineering*, 45, 102462.
- Huang, Y., Zhang, B., Liu, B., Su, S., Han, G., Wang, W., Guo, H., & Cao, Y. (2021). Clean and deep separation of molybdenum and rhenium from ultra-low concentration solutions via rapidly stepwise selective coagulation and flocculation precipitation. *Separation and Purification Technology*, 267, 118632.
- Jebur, M., Bachynska, Y., Hao, X., & Wickramasinghe, S. R. (2023). Integrated Electrocoagulation, Ultrafiltration, Membrane Distillation, and Crystallization for Treating Produced Water. In *Membranes* (Vol. 13, Issue 6).
- Kängsepp, P., Sjölin, M., Mutlu, A. G., Teil, B., & Pellicer-Nacher, C. (2019). First full-scale combined MBBR, coagulation, flocculation, Discfilter plant with phosphorus removal in France. *Water Practice and Technology*, 15(1), 19–27.
- Li, X., & Li, G. (2015). A Review: Pharmaceutical Wastewater Treatment Technology and Research in China. *Proceedings of the 2015 Asia-Pacific Energy Equipment Engineering Research Conference*, 9(Ap3er), 345–348.
- Oktiawan, W., Priyambada, I. B., & Ardhianto, R. (2020). Treatment of Leachate using Electrocoagulation Technology; Study case in Jatibarang Landfill-Semarang City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 448(1), 012056.
- Ozbey Unal, B., Dizge, N., Karagunduz, A., & Keskinler, B. (2019). Combined electrocoagulation and electrooxidation process in electro membrane bioreactor to improve membrane filtration effectiveness. *Bioresource Technology Reports*, 7, 100237.
- Shin, D. H., Shin, W. S., Kim, Y. H., Han, M. H., & Choi, S. J. (2006). Application of a combined process of moving-bed biofilm reactor (MBBR) and chemical coagulation for dyeing wastewater treatment. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 54(9), 181–189.
- Singh, D., Singh, D., Mishra, V., Kushwaha, J., Sengar, M., Sinha, S., Singh, S., & Giri, B. S. (2024). Strategies for biological treatment of waste water: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 454, 142266.
- Xu, Q., Huang, Q.-S., Luo, T.-Y., Wu, R.-L., Wei, W., & Ni, B.-J. (2021). Coagulation removal and photocatalytic degradation of microplastics in urban waters. *Chemical Engineering Journal*, 416, 129123.