

Optimalisasi Rancangan Unit Kontak Stabilisasi dan Parit Oksidasi untuk Pengolahan Air Limbah Industri Batik berdasarkan Variabel Desain Operasional

Allen Kurniawan^{1*}, Oktavian Wahyu Pratama Ajie¹, Azizzah Shofiatunnisa¹, Teuku Devan Assiddiqi¹, dan Alimah Hasyati Sahda¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor; email: allenkurniawan@apps.ipb.ac.id

ABSTRAK

Industri batik menghasilkan limbah cair dengan volume besar sebesar 80% dari total kebutuhan air. Integrasi pengolahan biologi dan fisikokimia merupakan alternatif terbaik untuk mereduksi kontaminan organik dan bahan kimia dari proses pewarnaan batik. Optimalisasi pengolahan biologi dari tipe konvensional lumpur aktif dapat menerapkan opsi unit kontak stabilisasi dan parit oksidasi. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan nilai efisiensi polutan organik, ketersediaan lahan, dan pengaruh waktu detensi/*hydraulic retention time* (HRT) untuk perencanaan unit kontak stabilisasi dan parit oksidasi. Tahapan desain dimulai dengan estimasi debit, konsentrasi polutan, dan penentuan nilai kriteria desain. Karakteristik air limbah industri batik memiliki konsentrasi BOD, COD, dan TSS berturut-turut dalam rentang 2050-2710 mg/L, 3855-78178 mg/L, dan 1180-1315 mg/L. Nilai efisiensi penyisihan bahan organik pada unit kontak sebesar 58,8%; unit stabilisasi sebesar 28,8%, serta unit parit oksidasi 96%. Kapasitas atau volume unit kontak stabilisasi sebesar 520 m³, lebih besar dibandingkan unit parit oksidasi sebesar 115,37 m³. Kontak stabilisasi membutuhkan luas area pengolahan sebesar 130 m², sedangkan parit oksidasi 96,15 m². HRT unit kontak stabilisasi (unit kontak sebesar 0,97 jam dan unit stabilisasi sebesar 4,67 jam) jauh lebih singkat dibandingkan parit oksidasi sebesar 27,6 jam. Dengan demikian, HRT singkat dan pada unit kontak stabilisasi dapat mengolah air limbah industri batik dalam kuantitas yang lebih besar dibandingkan unit parit oksidasi. Tergantung dari pencapaian kinerja pengolahan, kontak stabilisasi dan parit oksidasi memberikan solusi alternatif selain unit konvensional lumpur aktif untuk meningkatkan kualitas efluen air olahan. Desain unit ini dapat diimplementasikan untuk skala lapangan sebagai bagian dari integrasi pengolahan biologi dan fisikokimia.

Kata kunci: air limbah, batik, kontak stabilisasi, parit oksidasi, pengolahan biologi

ABSTRACT

The batik industry generates substantial volumes of wastewater, estimated at around 80% of total water usage. Integrating biological and physicochemical treatment methods is optimal for mitigating organic contaminants and chemicals derived from batik dyeing processes. The biological treatment of traditional activated sludge can be enhanced through contact stabilization and oxidation ditch approaches. This study aimed to evaluate the removal of organic pollutants, land footprint, and hydraulic retention time (HRT) in both treatment units. The design phase involved estimating flow rates and pollutant concentrations based on selected design criteria values. Wastewater characteristics were measured within 2050-2710 mg BOD/L concentration ranges, 3855-78178 mg COD/L, and 1180-1315 mg TSS/L. Organic matter removal percentages were 58.8% for contact stabilization, 28.8% for stabilization, and 96% for oxidation ditch processes. The contact stabilization capacity (520 m³) significantly exceeded the oxidation ditch capacity (115.37 m³), requiring larger surface areas of 130 m² and 96.15 m², respectively. Additionally, the HRT for contact stabilization (0.97 h) and stabilization (4.67 h) units was considerably shorter than that for the oxidation ditch unit (27.6 h). Consequently, the shorter HRT in the contact stabilization unit enables the treatment of larger wastewater volumes than the oxidation ditch unit. Depending on specific performance objectives, both systems offer alternative strategies for enhancing the traditional activated sludge process to yield higher-quality effluent. This design can be implemented at a field scale as part of the integrated biological and physicochemical processes.

Keywords: batik, biological treatment, contact stabilization, oxidation ditch, wastewater

Citation: Kurniawan, A., Ajie, O.W.P., Shofiatunnisa¹, A., Assiddiqi, T.D., dan Sahda, A.H. (2024). Optimalisasi Rancangan Unit Kontak Stabilisasi dan Parit Oksidasi untuk Pengolahan Air Limbah Industri Batik berdasarkan Variabel Operasional Desain. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(5), 1338-1348, doi:10.14710/jil.22.5.1338-1348

1. PENDAHULUAN

Batik merupakan warisan budaya Indonesia yang tinggi akan nilai sejarah dan telah ditetapkan oleh UNESCO warisan budaya tak benda (Indrayani, 2019). Meskipun batik memiliki dampak positif terhadap pertumbuhan ekonomi nasional, penggunaan air yang berlebih dan produksi limbah cair di badan air berpotensi mencemari lingkungan perairan dan merusak sistem ekologi lingkungan. Seringkali limbah cair tersebut dihasilkan dari aktivitas produksi dari proses pewarnaan, pencucian, dan pelepasan malam tanpa melalui proses pengolahan. Limbah cair batik dihasilkan sekitar 80% dari total kebutuhan air bersih (Tangahu & Ningsih, 2016). Air limbah industri batik biasanya memuat banyak senyawa organik, padatan tersuspensi, amonia, logam berat, *biochemical oxygen demand* (BOD), *chemical oxygen demand* (COD) atau polutan lainnya dalam konsentrasi tinggi (Lolo & Pambudi, 2020; Sulthonuddin & Herdiansyah, 2021). Senyawa-senyawa tersebut mempunyai struktur ikatan kimia penyusun yang lebih kompleks dibandingkan air limbah domestik. Selain itu, bahan kimia di dalam proses pewarnaan dan pembuatan motif batik (pewarna, lilin, aluminium sulfat, dan pati) juga dapat memengaruhi karakteristik kimia air limbah industri batik (Mukimin et al., 2017).

Karakteristik air limbah industri batik mempunyai kisaran konsentrasi BOD, COD, dan *total suspended solid* (TSS) berturut-turut dalam rentang 2050-2710 mg/L, 3855-7818 mg/L, dan 1180-1315 mg/L (Lolo & Pambudi, 2020). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. P.16/MENLHK/Setjen/ Kum.1/4/2019 tentang Baku Mutu Air Limbah, konsentrasi BOD, COD, dan TSS maksimum air limbah industri batik untuk dapat dapat diperkenankan dibuang ke lingkungan berturut-turut sebesar 60 mg/L, 150 mg/L, dan 50 mg/L. Jadi, penanganan khusus dengan alternatif pengolahan menjadi solusi terbaik sebelum air limbah dibuang ke lingkungan. Teknologi pengolahan harus bisa mendukung industri batik yang berkelanjutan, hemat secara ekonomi, diterima secara sosial, dan efektif secara lingkungan (Rahmadyanti et al., 2020).

Beberapa alternatif pengolahan secara fisik, kimiawi, maupun biologi dapat diimplementasikan untuk menangani air limbah batik. Jenis pengolahan tersebut dapat dijalankan sebagai unit tunggal ataupun beberapa kombinasi unit, tergantung dari kompleksitas karakteristik kualitas air limbah. Alternatif pengolahan secara kimiawi, seperti proses adsorpsi dan koagulasi, menjadi alternatif umum pengolahan air limbah industri batik terutama di dalam penyisihan warna. Akan tetapi, pengolahan secara biologi secara aerobik atau anaerobik merupakan alternatif lebih ekonomis berdasarkan pertimbangan biaya operasional dan dampak ke lingkungan. Melalui integrasi pengolahan biologi dengan pengolahan fisik-kimia (fisikokimia), kinerja pengolahan akan menjadi lebih optimal untuk peningkatan reduksi bahan organik, optimalisasi

presentase dekolonisasi, pengurangan toksisitas, dan pencapaian mineralisasi kontaminan (Paździor et al., 2017). Pengolahan biologi disarankan ditempatkan pada unit pengolahan awal (*pre-treatment*) sebelum unit fisikokimia (Ceretta et al., 2021). Unit pengolahan biologi berkontribusi untuk penghilangan zat organik dan warna secara keseluruhan, dan pengolahan fisikokimia berkolaborasi dalam proses degradasi kontaminan dalam waktu yang lebih singkat dan sterilisasi air limbah hasil olahan secara biologi.

Tipikal proses pengolahan biologis konvensional adalah lumpur aktif (*activated sludge*). Prinsip pengolahan proses lumpur aktif memanfaatkan bakteri aerobik, yaitu bakteri pengurai polutan organik dalam air limbah dengan memanfaatkan oksigen sehingga dihasilkan CO₂, H₂O, NH₄, dan sel biomassa baru (Zheng et al., 2013). Efisiensi penyisihan kontaminan sebagai substrat pada air limbah tekstil pada proses biologi secara aerobik dipengaruhi oleh rasio beban organik/pewarna dan beban mikroorganisme, suhu, dan konsentrasi oksigen dalam sistem (Holkar et al., 2016). Pengolahan lumpur aktif memiliki beberapa pengembangan atau modifikasi, antara lain sistem aerasi bertahap (*step aeration*), kontak stabilisasi, parit oksidasi (*oxidation ditch*), *sequencing batch reactor*, *aerated lagoon*, dan lain-lain. Sistem kontak stabilisasi memiliki perubahan konfigurasi lumpur aktif menjadi dua unit pengolahan biologis, yaitu unit kontak dan unit stabilisasi. Keunggulan sistem kontak stabilisasi, antara lain waktu tinggal air limbah yang relatif rendah, proses pengendapan lumpur yang lebih optimal, kemampuan sorpsi substrat yang cepat, dan konstruksi yang relatif mudah (Meerburg et al., 2015; Pertiwi et al., 2018). Dalam sistem kontak stabilisasi, lumpur kembali dioksidasi dalam unit stabilisasi terpisah selama beberapa jam untuk meregenerasi lumpur. Setelah itu, lumpur dicampur dengan influen dalam unit kontak selama waktu detensi yang relatif singkat untuk proses penyisihan kontaminan. Sementara itu, sistem parit oksidasi terdiri atas bak aerasi berupa parit berbentuk oval yang dilengkapi dengan rotor rotasi sebagai aerasi air limbah. Dalam proses pengolahannya, parit oksidasi memerlukan waktu detensi/*hydraulic retention time* (HRT) hampir 24 jam. Umumnya, sistem parit oksidasi dipakai untuk pengolahan air limbah komunitas kecil dan memerlukan lahan yang cukup besar (Hartaja & Setiadi, 2016). Kelebihan memakai parit oksidasi berupa dampak beban *shock* (*shock loading*) bisa dikurangi oleh waktu detensi yang panjang dengan proses pencampuran sempurna, produksi lumpur lebih rendah dibanding dengan metode pengolahan biologi lainnya; dan pemakaian energi bisa direduksi saat proses unit (Alramthi et al., 2022). Penggunaan unit kontak stabilisasi dan parit oksidasi memberikan alternatif pengolahan air limbah batik dalam mengatasi permasalahan proses lumpur aktif akibat efluen belum memenuhi baku mutu, waktu hidraulik

singkat, debit air limbah berfluktuasi, kurangnya aerasi, dan kesalahan operator (Said & Utomo, 2018).

Perancangan desain unit pengolahan kontak stabilisasi dan parit oksidasi untuk efektivitas dan efisiensi kinerja sistem pengolahan air limbah batik melibatkan beberapa faktor penting. Pertama, ukuran dan kapasitas unit harus dipertimbangkan dengan cermat untuk mengatasi beban air limbah dari sumber penghasil. Kedua, desain hidraulik yang baik juga sangat penting, termasuk pola aliran air limbah, waktu tinggal, dan kecepatan aliran dalam unit. Ketiga, pengendalian oksigen dan pH yang efektif juga diperlukan untuk memastikan ketersediaan oksigen yang cukup dan kondisi pH yang optimal di dalam unit. Proses oksidasi bahan organik dalam unit-unit seperti parit oksidasi memerlukan oksigen terlarut yang cukup untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme aerobik. Penambahan oksigen ke dalam air limbah biasanya dilakukan melalui aerasi atau pengadukan, dan kadar oksigen terlarut yang cukup dapat memengaruhi nilai pH secara tidak langsung. Ketika oksigen larut bereaksi dengan bahan organik dalam air limbah, dapat terjadi penurunan pH karena pembentukan asam karbonat dalam reaksi oksidasi. Oleh karena itu, meskipun tidak langsung diperhatikan dalam perencanaan, penting untuk memantau pH sebagai salah satu parameter operasional untuk memastikan kondisi lingkungan yang sesuai bagi mikroorganisme yang terlibat dalam proses pengolahan air limbah. Keempat, pengaturan waktu detensi yang tepat juga harus dipertimbangkan karena waktu detensi yang terlalu lama atau terlalu singkat dapat memengaruhi efisiensi pengolahan.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk memberikan desain sederhana alternatif unit serta membandingkan nilai efisiensi polutan organik, cakupan ketersediaan lahan, dan pengaruh HRT terhadap penggunaan unit kontak stabilisasi dan parit oksidasi pada pengolahan air limbah industri batik. Perbandingan ini memberikan alternatif teknologi pengolahan biologis air limbah industri batik, selain unit konvensional lumpur aktif, sebagai bagian dari integrasi pengolahan biologis dan fisikokimia.

2. METODE PENELITIAN

Desain unit kontak stabilisasi dan parit oksidasi memakai data kualitas air baku air limbah industri batik dari pengujian laboratorium dengan rentang konsentrasi parameter BOD, COD, TSS berturut-turut sebesar 2710 – 2050 mg/L; 37818 – 3855 mg/L; dan 1315 – 1180 mg/L. Debit air limbah pada satu industri batik sebesar 100 m³/hari. Unit kontak stabilisasi dan parit oksidasi dibuat untuk menurunkan parameter senyawa organik dengan nilai baku mutu 60 mgBOD/L, 150 mgCOD/L, dan 50 mgTSS/L menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.16/MENLHK/Setjen/KUM.1/4/2019 tentang Perubahan Kedua Atas Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.

1340

Unit pengolahan biologis memiliki beberapa kriteria desain di dalam perencanaan. Kriteria desain tersebut digunakan sebagai pembandingan antara nilai efisiensi polutan organik, cakupan ketersediaan lahan, dimensi, dan pengaruh HRT terhadap penggunaan unit sistem kontak stabilisasi dan sistem parit oksidasi. Kriteria desain pada Tabel 1 dan Tabel 2 mempertimbangkan aspek utama variabel operasional unit sebagai berikut:

- Waktu detensi (t_{dc} , t_{ds} , t_{po}) yaitu waktu rata-rata air limbah tertampung pada satu unit pengolahan. Waktu detensi biasanya diukur dalam satuan waktu dan dihitung dengan membagi volume unit pengolahan (V_c dan V_s) dengan aliran influen (Q) air limbah (Persamaan (8), (9), dan (15)). Waktu detensi yang tepat sangat penting pada proses pengolahan air limbah untuk memastikan mikroorganisme pengolahan memiliki cukup waktu untuk melakukan reaksi biologis/biokimia.
- Massa padatan (X_c dan X_s) merujuk pada total jumlah padatan tersuspensi (misalnya, lumpur aktif atau mikroorganisme pengolahan) dan padatan terlarut (misalnya, zat-zat terlarut dalam air limbah). Pengukuran massa padatan pada unit pengolahan dapat dipakai untuk indikator kinerja pengolahan air limbah, dan parameter untuk mengoptimalkan operasional unit pengolahan.
- Mixed liquor suspended solids* (MLSS) merujuk pada jumlah total padatan tersuspensi dalam lumpur aktif pada unit pengolahan air limbah sebagai indikator konsentrasi mikroorganisme pengolahan dalam unit pengolahan. Konsentrasi MLSS yang optimal dapat memengaruhi efisiensi pengolahan air limbah, serta dapat digunakan sebagai parameter untuk mengatur dosis aerasi dan pengaturan operasional unit pengolahan.
- Rasio *food to microorganism* (F/M) mendeskripsikan pada perbandingan antara jumlah zat organik (BOD atau COD) yang masuk ke unit pengolahan (sebagai substrat) dengan jumlah mikroorganisme (biomassa) pada unit tersebut. Rasio F/M biasanya dihitung dalam satuan massa zat organik per massa mikroorganisme (misalnya, mg BOD/mg MLSS) dan digunakan sebagai parameter untuk mengoptimalkan kinerja unit pengolahan, terutama pengaturan dosis aerasi atau pemompaan lumpur kembali (*return sludge*).
- Laju pertumbuhan spesifik mikroorganisme (μ) mengacu pada kecepatan pertumbuhan mikroorganisme pengolahan dalam unit pengolahan air limbah dapat digunakan sebagai indikator aktivitas mikroorganisme pengolahan dalam menguraikan zat organik dalam air limbah.
- Beban BOD (*BOD loading rate*) mengacu pada jumlah total BOD yang masuk ke dalam unit pengolahan dalam suatu periode waktu tertentu. Beban BOD yang optimal dapat digunakan sebagai acuan untuk mengatur dosis aerasi, pengaturan operasional, serta perencanaan kapasitas unit pengolahan agar efisiensi pengolahan air limbah dapat ditingkatkan.

Nilai efisiensi unit diperoleh dari debit influen dan efluen untuk dibandingkan dengan standar baku mutu. Waktu detensi disesuaikan dengan kriteria desain unit kontak stabilisasi dan parit oksidasi. Kapasitas unit dan ketersediaan lahan dihitung dari luas unit pada kontak stabilisasi atau luas unit parit oksidasi dengan kedalaman berdasarkan kriteria desain. Perhitungan desain unit kontak stabilisasi menggunakan Persamaan (1) – (9) pada Tabel 1 dan 2. Tabel 1 mendeskripsikan persamaan untuk

merancang unit kontak stabilisasi, antara lain volume, luas permukaan unit, waktu detensi, beberapa variabel operasional unit, dan parameter biokinetika. Tabel 2 terdapat persamaan untuk merancang unit parit oksidasi (Persamaan (10) – (19)), meliputi estimasi konsentrasi polutan di efluen, volume, dimensi unit, dan beberapa variabel operasional unit. Hasil analisis perencanaan akan selalu mengacu terhadap kriteria desain perencanaan pada Tabel 3.

Tabel 1. Dasar Perencanaan Desain Kontak Stabilisasi (Metcalf & Eddy Inc., 2014)

Deskripsi	Rumus	No. Pers.	Keterangan Notasi
Volume unit kontak	$V_c = Q(1+R)t_{dc}$		V_c = volume unit kontak (m ³)
Volume unit stabilisasi	$V_s = Q R t_{ds}$	(2)	V_s = volume unit stabilisasi (m ³)
Luas permukaan unit	$A_s = \frac{V_c}{H}$	(3)	Q = debit influen rata-rata (m ³ /detik)
Laju pertumbuhan spesifik mikroorganisme	$\mu = \frac{\mu_{max} S}{K_s + S}$	(4)	R = faktor resirkulasi
Konsentrasi MLSS pada unit kontak	$X_c = \frac{Q Y (S_0 - S)}{\mu V_c}$	(5)	t_{dc} = waktu detensi kontak (jam)
Konsentrasi MLSS pada unit stabilisasi	$X_c = \frac{X_c V_c}{V_c}$	(6)	t_{ds} = waktu detensi stabilisasi (jam)
Rasio F/M	$\frac{F}{M} = \frac{Q(S_0 - S)}{X_c V_c + X_s V_s}$	(7)	A_s = luas permukaan unit (m ²)
Waktu detensi unit kontak	$t_{dc} = \frac{V_c}{Q(1+R)}$	(8)	H = kedalaman (m)
Waktu detensi unit stabilisasi	$t_{ds} = \frac{V_s}{Q R}$	(9)	S_0 = konsentrasi BOD influen (mg/L)
			S = konsentrasi BOD efluen (mg/L)
			X_c = MLSS unit stabilisasi (mg/L)
			μ = laju pertumbuhan spesifik mikroorganisme (jam ⁻¹)
			μ_{max} = laju pertumbuhan spesifik maksimum mikroorganisme (jam ⁻¹)
			Y = yield coefficient (mgVSS/mg BOD ₅)

Tabel 2. Dasar Perencanaan Desain Parit Oksidasi (Metcalf & Eddy Inc., 2014)

Deskripsi	Persamaan	No. Pers.	Keterangan Notasi
Konsentrasi bCOD	$bCOD = 1,6 S$	(10)	bCOD = konsentrasi COD yang didegradasi secara biologis (mg/L)
Efisiensi COD	$\eta = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100\%$	(11)	η = efisiensi BOD (%)
Konsentrasi bCOD efluen	$bCOD_{efluen} = 1,6 \times \eta$	(12)	V_{po} = volume parit oksidasi (m ³)
Volume parit oksidasi	$V_{po} = \frac{Y Q (S_0 - S) \theta_c}{X_d (1 + k_d \theta_c)}$	(13)	Y = koefisien pembentukan biomassa (gVSS/gBOD)
Beban BOD	$BOD = \frac{Q S_0}{V}$	(14)	P' = panjang sisi lengkung (m)
Waktu detensi parit oksidasi	$t_{po} = \frac{V}{Q}$	(15)	P'' = panjang tiap sisi (m)
Luas permukaan parit	$A = \frac{V}{H}$	(16)	Q = debit influen rata-rata (m ³ /hari)
Panjang parit	$P = \frac{A}{H}$	(17)	S_0 = konsentrasi BOD (atau COD) influen (mg/L)
Panjang melengkung	$P' = 2\pi(r_1) + \pi(r_2) + \pi(r_3)$	(18)	S = konsentrasi BOD (atau COD) dalam efluen (mg/L)
Panjang tiap sisi	$P'' = \frac{\text{panjang parit} - \text{panjang sisi melengkung}}{4}$	(19)	H = kedalaman parit oksidasi (m)
			t_{po} = waktu detensi parit oksidasi (jam)
			θ_c = umur lumpur (hari)
			X_d = konsentrasi mikroorganisme dari MLVSS (mg/L)
			k_d = koefisien endogenous organik/kematian mikroorganisme (gVSS/gVSS·hari)

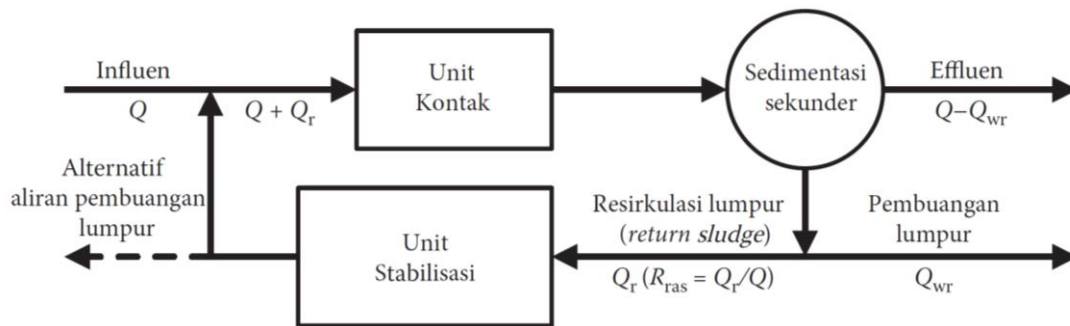
Tabel 3. Kriteria Desain Kontak Stabilisasi dan Parit Oksidasi (Davis, 2010; Qasim & Zhu, 2018)

Deskripsi Kriteria Desain	Unit	Nilai	
		Kontak Stabilisasi	Parit Oksidasi
Tipe unit	-	<i>plug flow</i>	<i>plug flow</i>
Umur lumpur/solid retention time (θ_c)	hari	5 – 10	4 – 48
Rasio F/M	hari ⁻¹	0,2 – 0,6	0,04 – 0,1
Volumetric organic loading (VOL)	kgBOD/m ³ ·hari	1 – 1,3	0,1 – 0,3
MLSS	mgTSS/L	1000 – 3000 ^a 5000 – 10.000 ^b	2000 – 5000
Waktu detensi/hydraulic retention time (t_{ds} , t_{dc} , dan t_{po})	jam	0,5 – 1 ^a 3 – 4 ^b	15 – 30
Rasio resirkulasi lumpur (R)	-	0,5 – 1	0,5 – 2
Laju pertumbuhan spesifik mikroorganisme (μ_{max})	hari ⁻¹	3 – 13,2	3 – 13,2
Koefisien setengah saturasi (K_s)	mg/L	5 – 40	5 – 40
Koefisien pembentukan biomassa (Y)	gVSS/gBOD	0,3 – 0,5	0,4 – 0,8
Koefisien kematian mikroorganisme (k_d)	hari ⁻¹	0,06 – 0,2	0,04 – 0,2

^aunit kontak, ^bunit stabilisasi.

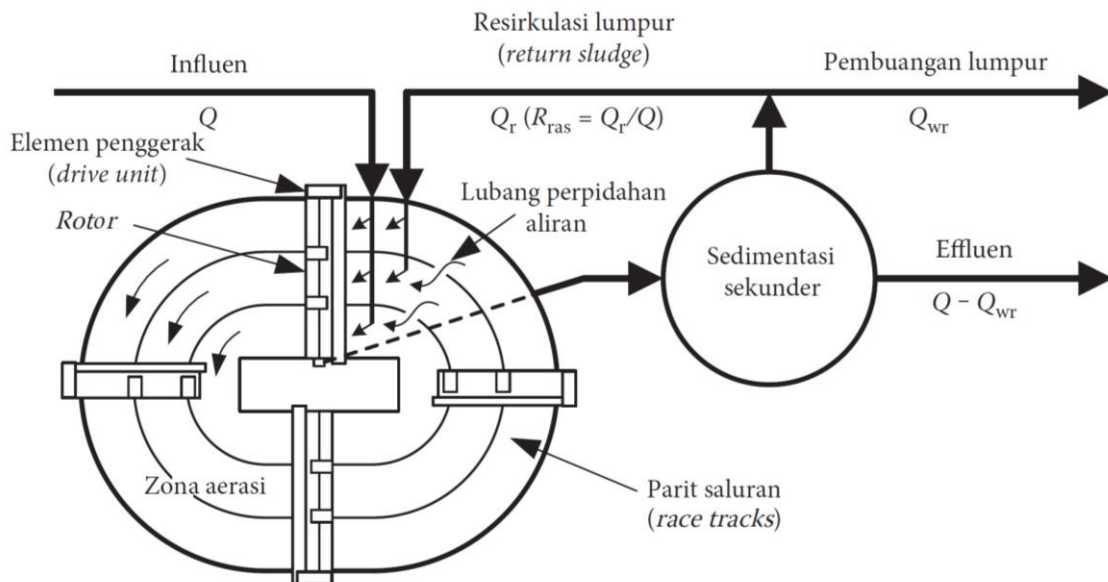
Desain perencanaan unit kontak stabilisasi dan parit oksidasi menggunakan tipe *plug flow* (Tabel 3). Pada tipe ini, aliran air limbah sejajar dengan sumbu unit dan berlangsung secara kontinu tanpa adanya pencampuran lateral yang signifikan (Riffat & Husnain, 2022). Kontak stabilisasi membutuhkan tiga unit pengolahan, yaitu kontak, stabilisasi, dan sedimentasi sekunder (Gambar 1). Proses resirkulasi lumpur menuju unit kontak, hasil dari proses separasi dari unit sedimentasi sekunder, diatur sebesar 5000 – 10000 mgMLSS/L sebelum diinjeksikan melalui sistem pompa (Tabel 3). Parit oksidasi membutuhkan saluran atau kanal berbentuk melingkar/oval dan dilengkapi dengan sistem pengaduk (*driven unit*) atau aerator untuk membantu proses aerasi dan pencampuran (Gambar 2). Aerator akan membantu mikroorganisme pengurai untuk mendapatkan oksigen dalam proses penguraian bahan organik air limbah industri batik. Unit pengendapan berupa

sedimentasi sekunder dibutuhkan untuk memisahkan lumpur aktif atau *return sludge* dari air yang diolah sebelum lumpur kembali dikembalikan ke saluran atau kanal utama (Gambar 2). Sistem pemisahan lumpur dapat membantu meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah dan mengurangi produksi lumpur. Proses resirkulasi lumpur berupa pengembalian sebagian biomassa hasil proses sedimentasi menuju parit saluran utama berfungsi untuk menjaga jumlah populasi mikroorganisme yang cukup untuk proses penguraian bahan organik (Xu et al., 2020). Selain itu, alat pengatur, seperti sensor, pengendali otomatis, dan sistem pemantauan, dapat digunakan dalam unit parit oksidasi untuk mengatur dan mengendalikan parameter operasional, seperti aerasi, suhu, kecepatan aliran, dan lain-lain, guna memastikan efisiensi dan efektivitas pengolahan air limbah.



Q_r = debit resirkulasi lumpur ($m^3/hari$); Q_{wr} = debit pembuangan lumpur ($m^3/hari$)

Gambar 1. Skematik Unit Konfigurasi Unit Kontak Stabilisasi



Gambar 2. Skematik Unit Konfigurasi Unit Parit Oksidasi (*Oxidation ditch*)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Desain Unit

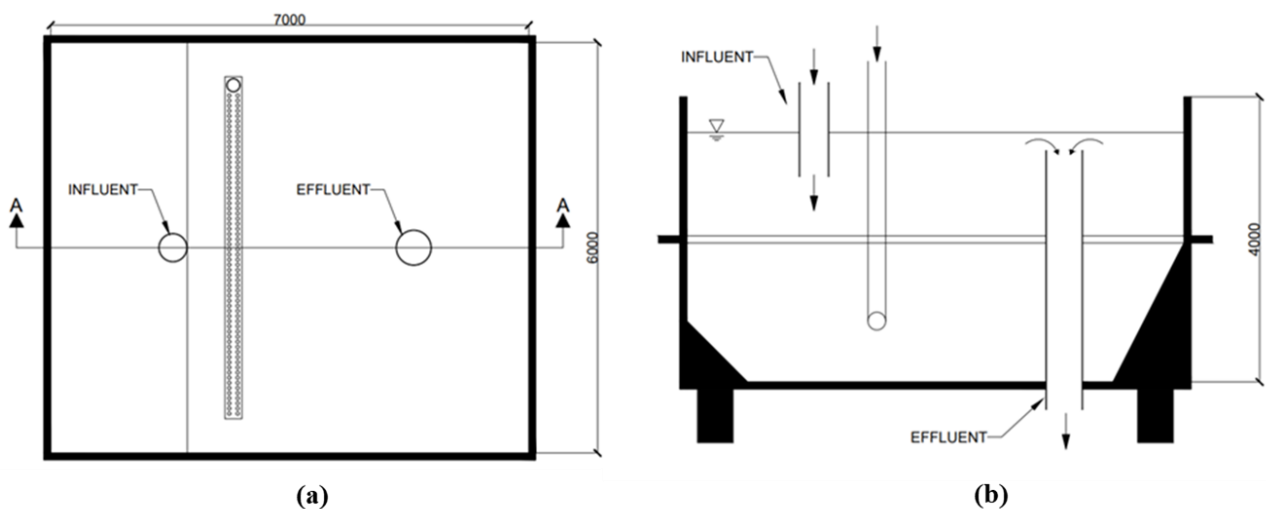
Perencanaan unit kontak stabilisasi terbagi menjadi dua unit, yaitu unit kontak dan unit stabilisasi. Air limbah dari unit kontak diendapkan pada unit sedimentasi sekunder dan dialirkan kembali pada unit stabilisasi untuk menstabilkan bahan organik. Berdasarkan kriteria desain pada Tabel 3, nilai parameter biokinetika unit kontak stabilisasi untuk variabel Y ditentukan sebesar 0,7 gVSS/gBOD, k_a sebesar 0,1 hari⁻¹, μ_{max} sebesar 6 hari⁻¹, dan K_s sebesar 5 mg/L, sedangkan unit parit oksidasi untuk variabel Y ditentukan sebesar 0,5 mg/L dan k_a sebesar 0,075 hari⁻¹. Hasil perhitungan volume unit kontak sebesar 170 m³ dan volume unit stabilisasi 350 m³ dengan kedalaman 4 m berdasarkan kriteria desain (Tabel 4). Luas permukaan unit kontak mencapai 42,5 m² dan luas permukaan unit stabilisasi sebesar 87,5 m² (Tabel 5). Beban BOD pada konsentrasi tertinggi pada unit kontak mencapai 106,7 mg/L; sedangkan pada unit stabilisasi sebesar 51,62 mg/L. Nilai efisiensi BOD pada unit kontak dihasilkan sebesar 58,8 %; sedangkan dan nilai efisiensi unit stabilisasi sebesar 28,8 % (Tabel 5). Untuk mencapai konsentrasi BOD efluen sesuai baku mutu sebesar 60 mg/L, efisiensi BOD harus mencapai 97 %. Gambar 1 desain unit kontak dan unit stabilisasi dengan bentuk persegi dilengkapi pipa inlet dan outlet.

Perhitungan parit oksidasi diawali dengan perhitungan nilai COD influen dengan nilai diperoleh secara berturut-turut dari konsentrasi BOD tinggi, rata-rata, dan rendah berturut-turut sebesar 4336 mg/L, 3808 mg/L, dan 3280 mg/L. Target konsentrasi BOD efluen sebesar 60 mg/L. Kapasitas volume parit oksidasi berdasarkan kuantitas BOD tertinggi diperoleh sebesar 115,37 m³ dengan t_{po} sebesar 27,6 jam. Nilai t_{po} tersebut sesuai dengan kriteria desain

karena berada dalam rentang 15-40 jam (Tabel 3). Nilai konsentrasi BOD tertinggi dipilih untuk memaksimalkan pengolahan pada saat kondisi maksimum kinerja proses. Parit oksidasi direncanakan menggunakan Tipe-U. Dimensi unit disesuaikan dengan tipikal kriteria desain dengan kedalaman 1,2 m; tinggi jagaan 0,5 m; lebar 1,8 m (Gambar 4 dan 5). Dengan demikian, luas permukaan parit oksidasi mencapai 96,15 m² berdasarkan pembagian volume unit dengan kedalaman berdasarkan konsentrasi BOD tertinggi. Dimensi parit oksidasi meliputi panjang parit sebesar 80,12 m; panjang sisi melengkung sebesar 28,9 m; serta panjang sisi lurus sebesar 13 m (Tabel 5). Jumlah produksi lumpur aktif per hari pada unit parit oksidasi sebesar 179 kgVSS/hari dan kebutuhan oksigen berkisar 128-170 kg/hari sesuai fluktuasi kuantitas BOD sehingga jumlah rotor dibutuhkan sebanyak 24 unit. Nilai efisiensi dari pengolahan parit oksidasi sebesar 80-90%, sementara untuk mencapai efluen BOD sesuai baku mutu diperlukan nilai efisiensi sebesar 97-98%. Dengan demikian, konsentrasi BOD influen parit oksidasi memengaruhi nilai efisiensi.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Desain Kontak Stabilisasi

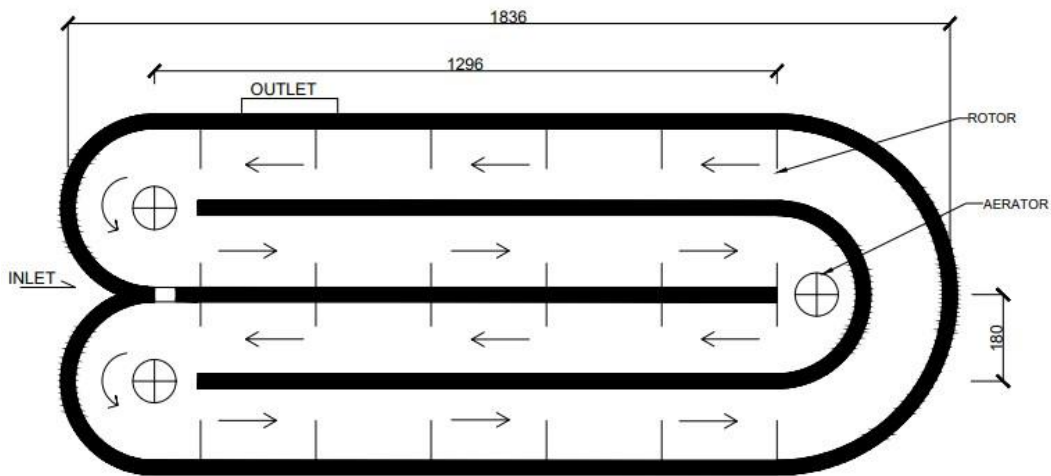
Parameter	Nilai	Satuan
Volume unit kontak (V_c)	170	m ³
Volume unit stabilisasi (V_s)	350	m ³
Kedalaman unit	4	m
Luas permukaan unit kontak (A_c)	42,5	m ²
Panjang unit kontak	7	m
Luas unit stabilisasi	87,5	m ²
Panjang unit stabilisasi	9,5	m
Tinggi jagaan	0,5	m
Kecepatan pertumbuhan spesifik	5,90	jam ⁻¹
Waktu detensi unit kontak	0,97	jam
Waktu detensi unit stabilisasi	4,67	jam
Rasio F/M	0,62	-
Efisiensi unit kontak	58,8	%
Efisiensi unit stabilisasi	28,6	%



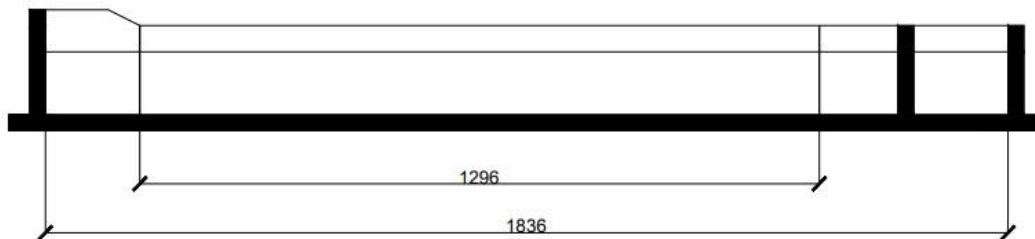
Gambar 3. Desain Kontak Stabilisasi: (a) Tampak Atas, dan (b) Potongan A-A (dalam mm)

Tabel 5. Perhitungan Desain Parit Oksidasi

Deskripsi	Nilai			Satuan
	COD tinggi	COD rata-rata	COD rendah	
Tahap A: Penentuan karakteristik air limbah untuk kebutuhan desain				
- Konsentrasi bCOD	4336	3808	3280	mg/L
- Efisiensi COD	98	97	97	%
- Konsentrasi bCOD efluen	96	96	96	mg/L
Tahap B: Kapasitas parit oksidasi				
- Volume parit oksidasi	115,37	101,01	86,64	m ³
- Waktu retensi hidraulik	27,68	24,24	20,79	jam
Tahap C: Dimensi parit oksidasi dirancang dengan tipe u				
- Luas kebutuhan permukaan parit	96,15	84,17	72,20	m ²
- Panjang parit	80,12	70,14	60,17	m
- Panjang sisi melengkung	28,29	28,29	28,29	m
- Panjang tiap sisi lurus	12,96	10,46	7,97	m
Tahap D : Kebutuhan oksigen				
- Jumlah lumpur aktif per hari	179	157	134	kg VSS/hari
- Menghitung kebutuhan oksigen	170	149	128	kg/hari
- Jumlah rotor	24	21	18	unit



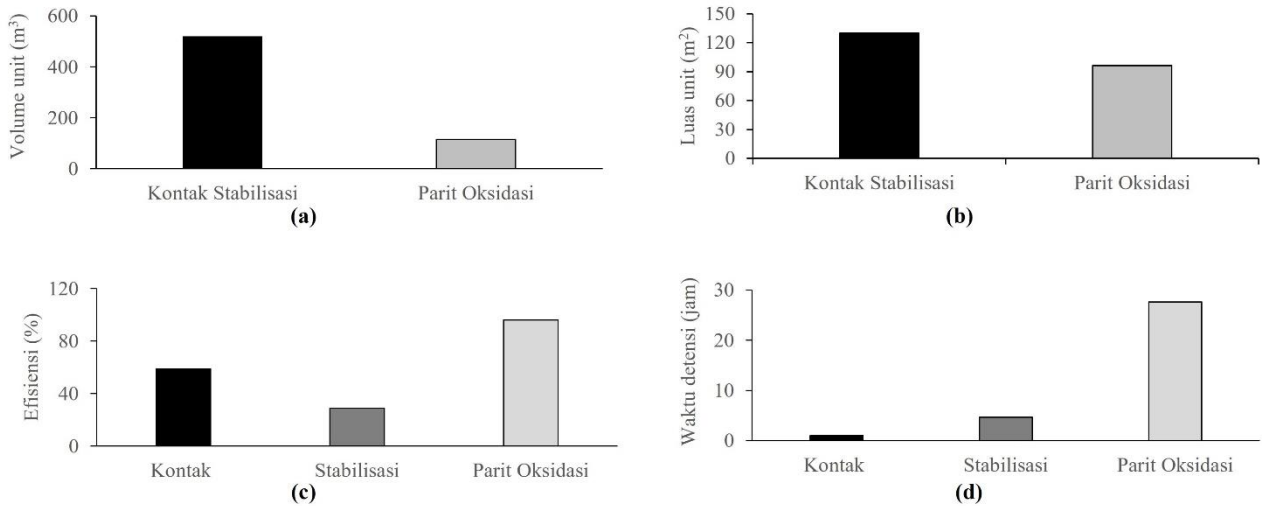
Gambar 4. Tampak Atas Desain Parit Oksidasi untuk Konsentrasi COD tinggi (dalam cm)



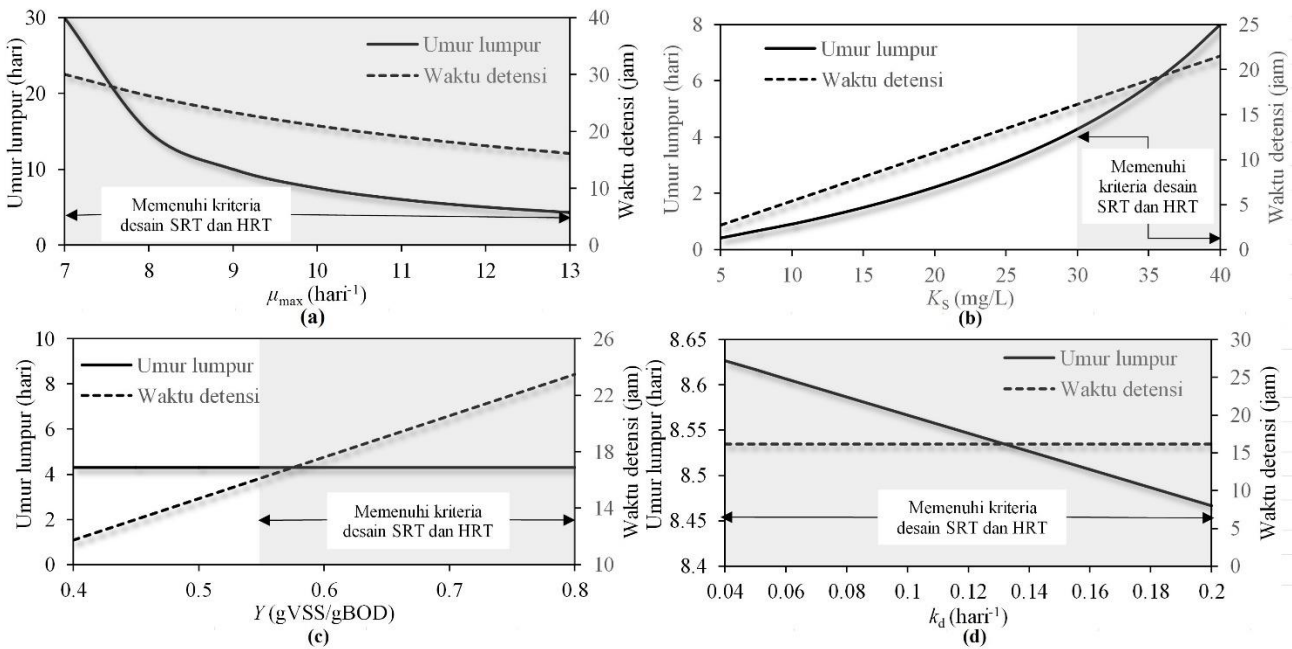
Gambar 5. Tampak Samping Desain Parit Oksidasi (dalam cm)

Nilai efisiensi pengolahan kontak stabilisasi dan parit oksidasi harus mencapai nilai 97 % untuk mencapai baku mutu. Namun, unit kontak, unit stabilisasi, dan unit parit oksidasi berturut-turut menghasilkan nilai efisiensi hanya sebesar 58,8 %; 28,8 %; dan 96% (Tabel 6 dan Gambar 6(d)). Parit oksidasi dapat menghasilkan nilai efisiensi lebih tinggi disebabkan waktu detensi lebih besar (96%) dibandingkan parit oksidasi sehingga kinerja proses degradasi substrat secara biologis lebih optimal. Perbandingan kapasitas atau volume unit kontak stabilisasi sebesar 520 m³ lebih besar dibandingkan unit parit oksidasi sebesar 115,37 m³ (Tabel 6 dan

Gambar 6(a)). Kebutuhan lahan untuk kontak stabilisasi seluas 130 m², sedangkan parit oksidasi hanya 96,15 m² (Tabel 6 dan Gambar 6(b)). Pada Gambar 6(c), waktu detensi kontak stabilisasi dibagi menjadi dua proses, yaitu 0,97 jam pada unit kontak dan 4,67 jam pada unit stabilisasi, sedangkan pada unit parit oksidasi menghasilkan HRT sebesar 27,6 jam sehingga waktu kontak antara mikroorganisme dan air limbah sebagai substrat berlangsung lebih singkat pada unit kontak stabilisasi. Nilai waktu detensi lebih kecil pada unit kontak stabilisasi menyebabkan nilai efisiensi menjadi lebih rendah dibandingkan unit parit oksidasi.



Gambar 6. Perbandingan (a) Volume, (b) Luas, (c) Efisiensi, dan (d) Waktu Detensi Unit Kontak Stabilisasi dan Parit Oksidasi



Gambar 7. Hubungan Variabel Biokinetika (a) μ_{max} , (b) K_s , (c) Y , dan (d) k_d terhadap Waktu Detensi dan Umur Lumpur

Tabel 6. Perbandingan Pengolahan Kontak Stabilisasi dengan Parit Oksidasi

Parameter	Kontak Stabilisasi	Parit Oksidasi
Volume unit (m ³)	520	115,37
Luas unit (m ²)	130	96,15
Waktu detensi (HRT) (jam)	Kontak = 0,97 Stabilisasi = 4,67	27,6
Efisiensi (%)	Kontak = 58,8 Stabilisasi = 28,8	96

3.2. Efek Variabel Biokinetika terhadap Desain Unit

Nilai variabel biokinetika μ_{max} , K_s , Y , dan k_d adalah parameter penting dalam desain unit pengolahan air limbah karena memberikan informasi tentang kinerja mikroorganisme untuk mengutilisasi bahan organik air limbah industri batik. Dengan menggunakan nilai biokinetika, perencana unit pengolahan air limbah dapat membuat pemodelan matematika untuk memprediksi kinerja unit pengolahan dalam berbagai

kondisi operasional. Hal ini dapat membantu perencanaan operasi unit pengolahan pada jangka panjang, memperkirakan efisiensi pengolahan pada kondisi yang berbeda, dan mengidentifikasi potensi masalah operasional. Berdasarkan hubungan Persamaan (13), Persamaan (15), serta Persamaan (20), nilai parameter biokinetika dapat diestimasi untuk mendapatkan waktu detensi (HRT) dan umur lumpur (θ_c) sesuai dengan kriteria desain unit pengolahan. Persamaan (20) merupakan hubungan antara θ_c dan laju pertumbuhan spesifik mikroorganisme melalui Persamaan Monod sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{\mu_{max} \cdot S}{K_s + S} - k_d \quad (20)$$

Parameter biokinetika μ_{max} mempengaruhi waktu detensi unit pengolahan air limbah. Umumnya, semakin tinggi nilai μ_{max} , maka semakin cepat pertumbuhan mikroorganisme dan semakin pendek waktu detensi untuk mencapai pengolahan yang efisien (Gambar 7(a)). Pertumbuhan mikroorganisme yang cepat karena mampu menguraikan bahan organik secara optimal menjadi produk sederhana, seperti air, karbon dioksida, dan biomassa (Udaiyappan et al., 2017). Semakin tinggi nilai μ_{max} , semakin pendek θ_c (Gambar 7(a)). Dalam sistem pengolahan air limbah, mikroorganisme dapat berkembang biak dengan cepat (μ_{max} tinggi) untuk menghasilkan lumpur baru dalam waktu yang relatif singkat. Akan tetapi, nilai μ_{max} yang sangat tinggi juga dapat menyebabkan beberapa masalah, seperti akumulasi lumpur yang berlebihan, penurunan kualitas pengolahan, dan risiko pengendapan mikroorganisme yang tidak diinginkan di dalam sistem pengolahan. Oleh karena itu, pemilihan nilai μ_{max} yang optimal harus memperhatikan keseimbangan antara laju pertumbuhan mikroorganisme yang cukup tinggi untuk menguraikan bahan organik secara efisien dan risiko akumulasi lumpur yang berlebihan atau penurunan kualitas pengolahan. Pada desain parit oksidasi, μ_{max} antara 7–13 hari⁻¹ telah memenuhi standar kriteria t_{po} dan θ_c dengan nilai optimum sebesar 13 hari⁻¹ untuk memperoleh nilai t_{po} dan θ_c terkecil (Gambar 7(a)). Nilai μ_{max} harus lebih besar dari 13 hari⁻¹ untuk mendapatkan t_{dc} dan t_{ds} optimum sebesar 0,5 – 4 jam dan θ_c optimum sebesar 5–10 hari untuk unit kontak stabilisasi.

Parameter biokinetika konsentrasi setengah saturasi (K_s) pada dalam pengolahan air limbah biologis mengacu pada konsentrasi substrat yang diperlukan oleh mikroorganisme untuk mencapai aktivitas maksimum atau laju pertumbuhan maksimum (Mohiuddin et al., 2022). Semakin tinggi nilai K_s , semakin tinggi konsentrasi substrat yang diperlukan oleh mikroorganisme untuk mencapai laju pertumbuhan maksimum (Lotti et al., 2015; Mohiuddin et al., 2022). Jika konsentrasi substrat influen melebihi nilai K_s , mikroorganisme akan memerlukan waktu detensi lebih lama untuk mengkonsumsi substrat tersebut dan mencapai laju pertumbuhan maksimum (Gambar 7(b)). Kondisi ini mengakibatkan θ_c menjadi relatif lebih lama untuk memastikan bahwa substrat dalam air limbah telah cukup dikonsumsi oleh mikroorganisme sebelum air limbah keluar dari unit pengolahan. Pada desain parit oksidasi, K_s terpilih pada kisaran 30–40 mg/L untuk dapat memenuhi standar kriteria t_{po} dan θ_c . Nilai optimum K_s sebesar 30 mg/L untuk memperoleh nilai t_{po} dan θ_c terkecil (Gambar 7(b)). Nilai K_s harus dipilih pada kisaran di bawah 10 mg/L untuk memperoleh waktu detensi t_{dc} dan t_{ds} yang singkat pada unit kontak stabilisasi. Kondisi ini sejalan dengan peningkatan nilai μ_{max} dan diikuti dengan nilai K_s kecil untuk memperoleh nilai waktu detensi dan umur lumpur yang lebih singkat.

1346

Parameter biokinetika pembentukan biomassa, Y (*yield coefficient*) mengacu pada rasio antara massa biomassa yang dihasilkan oleh mikroorganisme dengan massa substrat yang dikonsumsi dalam proses biodegradasi. Pada prinsipnya, nilai Y tidak memengaruhi θ_c (berdasarkan Persamaan (20)), tetapi memengaruhi konsentrasi biomassa. Semakin tinggi nilai Y , semakin besar produksi biomassa dan semakin rendah konsumsi oksigen (Dionisi, 2017). Dengan demikian, peningkatan biomassa akan berdampak pada peningkatan waktu detensi unit pengolahan (Gambar 7(c)). Pada desain parit oksidasi, standar kriteria t_{po} dan θ_c pada Tabel 3 akan terpenuhi apabila nilai Y berada pada kisaran 0,55 – 0,8 gVSS/gBOD. Nilai optimum Y sebesar 0,55 gVSS/gBOD untuk memperoleh nilai t_{po} dan θ_c terkecil (Gambar 7(c)). Nilai Y harus dipilih lebih kecil dari 0,1 gVSS/gBOD ($Y >> 0,1$ gVSS/gBOD) untuk memperoleh waktu detensi t_{dc} dan t_{ds} yang singkat pada unit kontak stabilisasi. Sebagai informasi tambahan, hubungan antara variabel Y dan waktu detensi tidak bersifat linier dan dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor lain seperti jenis mikroorganisme, suhu, pH, kualitas air limbah yang diolah, dan kondisi operasional lainnya.

Semakin tinggi nilai parameter biokinetika laju kematian mikroorganisme (k_d), maka θ_c akan cenderung lebih pendek (Gambar 7(d)). Kondisi tersebut karena laju kematian mikroorganisme di dalam unit pengolahan akan lebih cepat sehingga jumlah mikroorganisme yang tetap hidup akan berkurang lebih cepat pula. Oleh karena itu, θ_c yang diinginkan dalam desain unit pengolahan harus lebih panjang untuk menjaga keseimbangan antara pertumbuhan dan kematian mikroorganisme untuk mencapai efisiensi pengolahan yang maksimal (Li & Wu, 2014). Umur lumpur yang terlalu pendek dapat mengakibatkan hilangnya mikroorganisme yang berdampak negatif pada kualitas pengolahan air limbah, sedangkan umur lumpur yang terlalu panjang dapat menyebabkan akumulasi biomassa yang berlebihan dan meningkatkan risiko masalah operasional, seperti penumpukan lumpur. Pada desain parit oksidasi, k_d antara 0,04–0,2 hari⁻¹ telah memenuhi standar kriteria t_{po} dan θ_c dengan nilai optimum sebesar 0,04 hari⁻¹ untuk memperoleh nilai θ_c terbesar (Gambar 7(a)).

4. KESIMPULAN

Pengolahan biologis parit oksidasi memiliki nilai efisiensi (96%) lebih besar dari pengolahan kontak stabilisasi (kontak 58,8 % dan stabilisasi 28,8 %). Dari aspek ketersediaan lahan, oksidasi parit oksidasi membutuhkan lahan lebih sedikit (96,15 m²) dibandingkan kontak stabilisasi ketika parit oksidasi (130 m²). Unit kontak stabilisasi membutuhkan waktu detensi lebih cepat dibandingkan parit oksidasi. Nilai HRT kontak stabilisasi terbagi menjadi dua kompartemen, yaitu unit kontak sebesar 0,97 jam dan unit stabilisasi sebesar 4,67 jam. Unit parit oksidasi membutuhkan HRT sebesar 27,6 jam. Dengan demikian, HRT yang tinggi pada unit parit oksidasi

Kurniawan, A., Ajie, O.W.P., Shofiatunnisa', A., Assiddiqi, T.D., dan Sahda, A.H. (2024). Optimalisasi Rancangan Unit Kontak Stabilisasi dan Parit Oksidasi untuk Pengolahan Air Limbah Industri Batik berdasarkan Variabel Operasional Desain. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(5), 1338-1348, doi:10.14710/jil.22.5.1338-1348

menghasilkan nilai efisiensi yang lebih tinggi karena waktu kontak antara air limbah industri batik dan mikroorganisme berlangsung lebih panjang sehingga substrat dapat terutilisasi secara optimum untuk menghasilkan proses degradasi kontaminan yang besar. Pada proses perencanaan, nilai biokinetika adalah parameter penting untuk membantu optimalisasi desain unit pengolahan, prediksi kinerja operasional, reduksi biaya operasional, dan penyesuaian desain untuk memenuhi tujuan khusus. Penelitian membutuhkan kajian studi lapang sehingga dapat dilakukan proses verifikasi antara data perencanaan dan data lapangan. Beberapa variabel kriteria desain dapat berubah seiring dengan input data kajian yang melibatkan faktor-faktor lingkungan, seperti fluktuasi kuantitas air limbah industri batik, beban pencemar, dan perubahan cakupan area pelayanan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alramthi, S. M., Ali, G. H., Elthagafi, A. M., Eldosari, S. H., Zhu, B. K., & Safaa, H. M. (2022). Oxidation Ditches for Recycling and Reusing Wastewater Are Critical for Long-Term Sustainability—A Case Study. *Sustainability (Switzerland)*, 14(24). <https://doi.org/10.3390/su142416737>
- Ceretta, M. B., Necessian, D., & Wolski, E. A. (2021). Current Trends on Role of Biological Treatment in Integrated Treatment Technologies of Textile Wastewater. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 12, pp. 1–7). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.651025>
- Davis, M. L. (2010). *Water and Wastewater Engineering Design Principles and Practice*. McGraw Hill.
- Dionisi, D. (2017). Biological wastewater treatment processes: Mass and heat balances. In *Biological Wastewater Treatment Processes: Mass and Heat Balances*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315163345>
- Hartaja, D. R. K., & Setiadi, I. (2016). Design planning wastewater treatment plant of nata de coco industry with the activated sludge process. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 9(2), 97–112. <https://doi.org/10.29122/jrl.v9i2.1994>
- Holkar, C. R., Jadhav, A. J., Pinjari, D. V., Mahamuni, N. M., & Pandit, A. B. (2016). A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 182, pp. 351–366). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.090>
- Indrayani, L. (2019). Teknologi pengolahan limbah cair batik dengan IPAL BBKB sebagai salah satu alternatif percontohan bagi industri batik. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan,"* 8.
- Li, B., & Wu, G. (2014). Effects of sludge retention times on nutrient removal and nitrous oxide emission in biological nutrient removal processes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(4), 3553–3569. <https://doi.org/10.3390/ijerph110403553>
- Lolo, E. U., & Pambudi, Y. S. (2020). Penurunan Parameter Pencemar Limbah Cair Industri Tekstil Secara Koagulasi Flokulasi (Studi Kasus: IPAL Kampung Batik Laweyan, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia). *Jurnal Serambi Engineering*, 5(3), 1090–1098. <https://doi.org/10.32672/jse.v5i3.2072>
- Lotti, T., Kleerebezem, R., Abelleira-Pereira, J. M., Abbas, B., & van Loosdrecht, M. C. M. (2015). Faster through training: The anammox case. *Water Research*, 81, 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.001>
- Meerburg, F. A., Boon, N., Van Winckel, T., Vercamer, J. A. R., Nopens, I., & Vlaeminck, S. E. (2015). Toward energy-neutral wastewater treatment: A high-rate contact stabilization process to maximally recover sewage organics. *Bioresource Technology*, 179, 373–381. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.018>
- Metcalf & Eddy Inc. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw Hill.
- Mohd Udaiyappan, A. F., Abu Hasan, H., Takriff, M. S., & Sheikh Abdullah, S. R. (2017). A review of the potentials, challenges and current status of microalgae biomass applications in industrial wastewater treatment. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 20, pp. 8–21). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.09.006>
- Mohiuddin, O., Harvey, A. P., Tabraiz, S., Ameen, M. T., & Velasquez-Orta, S. (2022). Kinetic modelling of yeast growth and pollutant removal in secondary effluent. *Journal of Water Process Engineering*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103244>
- Mukimin, A., Zen, N., Purwanto, A., Wicaksono, K. A., Vistanty, H., & Alfauzi, A. S. (2017). Application of a full-scale electrocatalytic reactor as real batik printing wastewater treatment by indirect oxidation process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 5222–5232. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.053>
- Paździor, K., Wrębiak, J., Klepacz-Smółka, A., Gmurek, M., Bilińska, L., Kos, L., Sójka-Ledakowicz, J., & Ledakowicz, S. (2017). Influence of ozonation and biodegradation on toxicity of industrial textile wastewater. *Journal of Environmental Management*, 195, 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.055>
- Pertiwi, R. M. P., Tazkiaturrizki, T., & Ratnaningsih, R. (2018). Penentuan Kriteria Disain Tangki Kontak Stabilisasi untuk Pengolahan Air Limbah Domestik Zona 6, Duri Kosambi, Jakarta Barat. *Seminar Nasional Kota Berkelanjutan*, 40–50.
- Qasim, S. R., & Zhu, G. (2018). *Wastewater Treatment and Reuse - Theory and Design Examples: Principles and Basic Treatment*. CRC Press.
- Rahmadyanti, E., Wiyono, A., & Firmansyah, G. A. (2020). Integrated system of biofilter and constructed wetland for sustainable batik industry. *International Journal of Geomate*, 18(70), 138–148. <https://doi.org/10.21660/2020.70.61681>
- Riffat, R., & Husnain, T. (2022). Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering. In *Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003134374>
- Said, N. I., & Utomo, K. (2018). Pengolahan air limbah domestik dengan proses lumpur aktif yang diisi dengan media bioball. *Jurnal Air Indonesia*, 3(2), 160–174. <https://doi.org/10.29122/jai.v3i2.2337>
- Sulthonuddin, I., & Herdiansyah, H. (2021). Sustainability of Batik wastewater quality management strategies: analytical hierarchy process. *Applied Water Science*, 1347

- 11(2), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01360-1>
- Tangahu, B. V., & Ningsih, D. A. (2016). Uji Penurunan Kandungan COD, BOD pada Limbah Cair Pewarnaan Batik Menggunakan Scirpus Grossus dan Iris Pseudacorus dengan Sistem Pemaparan Intermittent. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 8(2), 121-130. <https://doi.org/10.20885/jstl.vol8.iss2.art6>
- Xu, D., Li, J., Liu, J., & Ma, T. (2020). Rapid aerobic sludge granulation in an integrated oxidation ditch with two-zone clarifiers. *Water Research*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115704>
- Zheng, C., Zhao, L., Zhou, X., Fu, Z., & Li, A. (2013). Treatment Technologies for Organic Wastewater. In W. Elshorbagy & R. K. Chowdhury (Eds.), *Water Treatment* (pp. 250-286). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/52665>