

Pengaruh Kecepatan Rotasi Unit Modifikasi Rotating Biological Contactor terhadap Kinerja Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit

Rais Rahmadi¹, Allifiya Salsabil Nugrohoptri¹, Mayandra Salsabhila Adam², Ariani Dwi Astuti², dan Allen Kurniawan^{1*}

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Jawa Barat, Indonesia; *e-mail: allenkurniawan@apps.ipb.ac.id

²Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Arsitektur Lanskap dan Teknologi Lingkungan, Universitas Trisakti, Grogol, Jakarta, Indonesia

ABSTRAK

Limbah cair kelapa sawit (LCKS) mengandung bahan organik dan padatan tersuspensi yang tinggi sehingga berbahaya jika dibuang ke lingkungan tanpa melalui proses pengolahan. Beberapa modifikasi unit pengolahan biologis terus dikembangkan untuk mengolah LCKS, antara lain unit rotating biological contactor (RBC). Penelitian bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh variasi kecepatan rotasi dan penggunaan bioball terhadap kinerja unit modifikasi RBC. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan unit RBC berskala laboratorium dengan variasi kecepatan rotasi sebesar 3, 5, dan 8 rpm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan rotasi secara signifikan memengaruhi kinerja sistem RBC. Penurunan kecepatan rotasi dari 8 rpm menjadi 3 rpm meningkatkan efisiensi penyisihan soluble chemical oxygen demand (SCOD) secara signifikan dari 62% menjadi 67,4% dan efisiensi total suspended solid (TSS) dari 66% menjadi 92,4%. Kecepatan rotasi rendah pada kandungan organik dan padatan tersuspensi yang tinggi akan memungkinkan lebih banyak waktu kontak antara LCKS dan mikroorganisme sehingga proses transfer oksigen menjadi lebih optimal untuk proses biodegradasi substrat. Walaupun efisiensi SCOD dan TSS mengalami peningkatan yang signifikan, nilai konsentrasi kedua parameter belum memenuhi baku mutu. Oleh karena itu, unit modifikasi RBC perlu diintegrasikan dengan unit pra-pengolahan seperti koagulasi-flokulasi atau media pertumbuhan attached growth tipe lain, seperti honeycomb untuk menghasilkan nilai konsentrasi effluen yang lebih optimum.

Kata kunci: bioball, kecepatan rotasi, limbah cair kelapa sawit, rotating biological contactor, transfer oksigen.

ABSTRACT

Palm oil mill effluent (POME) poses environmental hazards due to its high organic and suspended solid content, necessitating proper treatment prior to discharge. To address this issue, the study explores modified rotating biological contactors (RBCs) as a promising treatment unit for POME. Specifically, the investigation focuses on the influence of varying rotation speeds and the incorporation of bioballs in the RBC unit. Laboratory-scale RBCs were operated at rotation speeds of 3, 5, and 8 rpm. The findings demonstrate that rotation speed significantly affects the RBC system's efficiency. Decreasing the rotation speed from 8 rpm to 3 rpm resulted in notable enhancements in soluble chemical oxygen demand (SCOD) removal efficiency (from 62% to 67.4%) and total suspended solid (TSS) removal efficiency (from 66% to 92.4%). Lower rotation speeds allowed for extended contact time between POME and microorganisms, facilitating improved oxygen transfer and substrate biodegradation. Despite these improvements, the achieved SCOD and TSS removal efficiencies did not yet meet the required effluent quality standards. Therefore, integration of the modified RBC unit with pre-treatment methods such as coagulation-flocculation or alternative attached growth media, such as honeycomb, is recommended to attain more optimal effluent concentration levels.

Keywords: bioball, oxygen transfer, palm oil mill effluent, rotating biological contactor, rotation speed.

Citation: Rahmadi, R., Nugrohoptri, A. S., Adam, M. S., Astuti, D. W., dan Kurniawan, A. (2025). Pengaruh Kecepatan Rotasi Unit Modifikasi Rotating Biological Contactor terhadap Kinerja Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(1), 73-84, doi:10.14710/jil.23.1.73-84

1. PENDAHULUAN

Indonesia menjadi salah satu negara penghasil *crude palm oil* (CPO) terbesar di dunia dengan total

estimasi jumlah produksi mencapai 49,12 juta ton pada total luasan 15 juta hektar pada tahun 2020 (Said, 2017). Produksi CPO di Indonesia terus

meningkat setiap tahun karena luasnya area perkebunan kelapa sawit dan permintaan yang tinggi di pasar domestik dan internasional. Akan tetapi, peningkatan produksi CPO memberikan dampak beberapa permasalahan lingkungan, salah satunya *palm oil mill effluent* (POME) atau limbah cair kelapa sawit (LCKS). Jumlah produksi LCKS dari produksi CPO dihasilkan sebesar 0,5 – 7,5 ton dari total satu ton olahan tandan buah segar kelapa sawit (Ahmed et al., 2015).

LCKS mengandung berbagai bahan organik, padatan tersuspensi, minyak, lemak, protein, karbohidrat, nitrogen, fosfor, dan senyawa-senyawa lainnya. Kandungan bahan organik yang sangat tinggi bersumber dari proses ekstraksi, sterilisasi, kondensasi, pengepresan, dekantasi, dan pengendapan (Ahmed et al., 2015; Krishnan et al., 2019). Kandungan bahan organik pada LCKS, terutama minyak dan lemak, memiliki potensi pencemaran lingkungan yang serius jika tidak dikelola melalui penanganan terpadu. LCKS baku umumnya memiliki karakteristik kisaran konsentrasi *biochemical oxygen demand* (BOD) sebesar 25.000 – 65.714 mg/L, *chemical oxygen demand* (COD) sebesar 44.300 – 102.696 mg/L, dan *total suspended solid* (TSS) sebesar 18.000 – 46.011 mg/L, minyak dan lemak sebesar 4000 – 9341 mg/L, total nitrogen (TN) sebesar 750 – 770 mg/L, dan amonia sebesar 35 – 103 mg/L (Chin et al., 2013). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 5 tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah, baku mutu limbah bagi usaha industri kelapa sawit ditetapkan berturut-turut sebesar 100 mg-BOD/L, 350 mg-COD/L, 250 mg-TSS/L, 25 mg-minyak dan lemak/L, serta 50 mg-TN/L. Dengan demikian, LCKS perlu diolah untuk mereduksi dampak negatif terhadap lingkungan, seperti pencemaran air, bau, produksi gas metana, dan karbondioksida (Yulastri et al., 2013).

Pengolahan air limbah secara biologis menjadi metode yang tepat untuk meminimalisasi dampak LCKS karena memiliki tingkat efektivitas penyisihan kontaminan yang tinggi, biaya operasi yang lebih murah, dan dampak lingkungan yang lebih sedikit (Guadalima & Monteros, 2018). Beberapa alternatif pengolahan biologis terus dikembangkan untuk mengolah LCKS berdasarkan tipe *suspended growth* dan *attached growth*. Sistem pengolahan LCKS yang paling umum digunakan berupa kolam aerasi (*aerated lagoon*) tipe *suspended growth*. Walaupun unit tersebut mudah dioperasikan secara operasional, unit *aerated lagoon* membutuhkan lahan yang luas, konsumsi energi yang tinggi, serta waktu detensi yang panjang. Penyediaan lahan untuk unit *aerated lagoon* dapat mencapai 15.440 – 42.500 m² dengan waktu detensi pengolahan berkisar 116 – 192 hari (Rahardjo, 2009). Oleh karena itu, modifikasi teknologi pengolahan terus dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi penyisihan kontaminan optimal serta efektivitas pengolahan terkait waktu

detensi yang relatif singkat dan reduksi luasan lahan pengolahan.

Rotating biological contactor (RBC) merupakan salah satu unit pengolahan biologis *attached growth* melalui pemanfaatan media pertumbuhan mikroorganisme pada cakram (*disk*) berputar untuk proses utilisasi dan biodegradasi bahan organik. Koloni mikroorganisme pada media pertumbuhan akan membentuk lapisan biofilm berupa matriks ekstraseluler yang terdiri atas polisakarida, protein, dan bahan organik lain dari hasil mekanisme biodegradasi (Sivadon et al., 2019). Mekanisme proses pada RBC dilakukan secara aerobik pada media air limbah dan kombinasi antara proses anaerobik dan aerobik pada lapisan biofilm, tergantung dari ketebalan lapisan (Loupasaki & Diamadopoulos, 2013). Cakram RBC akan berputar pada media poros yang dipasang secara horizontal dengan 40-50% terendam (*submerged*) air limbah. Mikroorganisme akan melakukan proses oksigenasi pada saat terakumulasi di udara serta proses biodegradasi pada saat kontak langsung dengan air limbah. Suplai oksigen yang cukup bagi mikroorganisme memungkinkan sistem tidak membutuhkan aerator tambahan untuk penguraian bahan organik kompleks LCKS sehingga mereduksi konsumsi energi (Ahmed et al., 2015). Waktu detensi pada RBC dapat dipersingkat karena volume lumpur yang dihasilkan rendah (Guadalima & Monteros, 2018). Akan tetapi, media pelekak berupa mikroorganisme pada RBC konvensional hanya terletak pada sisi terluar cakram RBC sehingga bidang kontak (*surface area*) antara air limbah dengan mikroorganisme menjadi sangat terbatas. Akibatnya, pH, nilai oksigen terlarut, dan efisiensi waktu pengolahan menjadi rendah (Waqas et al., 2023). Oleh karena itu, media pertumbuhan mikroorganisme pada unit RBC dapat dimodifikasi melalui penambahan *biological ball* (*bioball*) untuk meningkatkan efektivitas pengolahan.

Penambahan *bioball* ke dalam cakram RBC akan memberikan media yang ideal bagi pertumbuhan dan penyebaran mikroorganisme untuk mengolah konsentrasi bahan organik LCKS yang tinggi (Xiao et al., 2019). Permukaan pori-pori *bioball* memberikan tempat yang besar bagi mikroorganisme, seperti bakteri dan protozoa, untuk tumbuh dan membentuk biofilm. Biofilm ini berperan dalam dekomposisi bahan organik LCKS dengan cara mengoksidasi senyawa-senyawa organik terlarut (Soo et al., 2022). Keuntungan penggunaan *bioball* pada RBC adalah peningkatan efisiensi unit RBC untuk pengolahan LCKS. Dengan adanya *bioball*, area permukaan kontak antara mikroorganisme dan air limbah akan meningkat sehingga mendukung optimalisasi kemampuan mikroorganisme untuk menguraikan polutan LCKS. Selain itu, *bioball* juga membantu menjaga stabilitas operasional RBC dengan mencegah penggumpalan dan pengendapan mikroorganisme. Modifikasi ini diharapkan dapat meningkatkan kinerja pengolahan RBC karena memperluas bidang

lekatan mikroorganisme hingga 60% dibandingkan RBC konvensional (Cortez *et al.*, 2013).

Kinerja pengolahan RBC dipengaruhi oleh aspek parameter desain, yaitu kecepatan rotasi, tingkat pemuatan organik dan hidraulik, waktu retensi hidraulik, jenis media RBC, temperatur, karakteristik air limbah dan biofilm, tingkat oksigen terlarut, resirkulasi limbah dan padatan, dan perendaman cakram (Cortez *et al.*, 2013). Aspek kecepatan rotasi merupakan salah satu faktor utama di dalam pengoperasian RBC karena memengaruhi proses transfer oksigen dan efisiensi kinerja reaktor. Umumnya, peningkatan kecepatan rotasi berbanding lurus dengan konsentrasi oksigen terlarut yang tersedia bagi mikroorganisme dan sebagai hasilnya mampu mereduksi substrat pada tingkat yang lebih tinggi (Israni *et al.*, 2002). Namun, peningkatan kecepatan rotasi menyebabkan konsumsi daya yang lebih tinggi dan tidak ekonomis untuk diaplikasikan dalam pengolahan limbah cair (Ramsay *et al.*, 2006). Selain itu, jika kecepatan rotasi terlalu tinggi, mikroorganisme akan terlepas dari media, serta kualitas efluen dan laju biodegradasi dalam reaktor akan menurun (Said, 2017). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh variasi kecepatan rotasi RBC terhadap efektivitas pengolahan LCKS di dalam unit RBC melalui penggunaan *bioball* sehingga diperoleh nilai penyisihan bahan organik LCKS optimum. Berdasarkan penentuan pengaruh variasi kecepatan rotasi RBC terhadap efektivitas pengolahan, penelitian ini menggunakan tiga variasi kecepatan rotasi, yaitu 3 rpm, 5 rpm, dan 10 rpm yang dioperasikan dengan kisaran beban organik sebesar 3000 – 5400 mg COD/L.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Alat dan Bahan

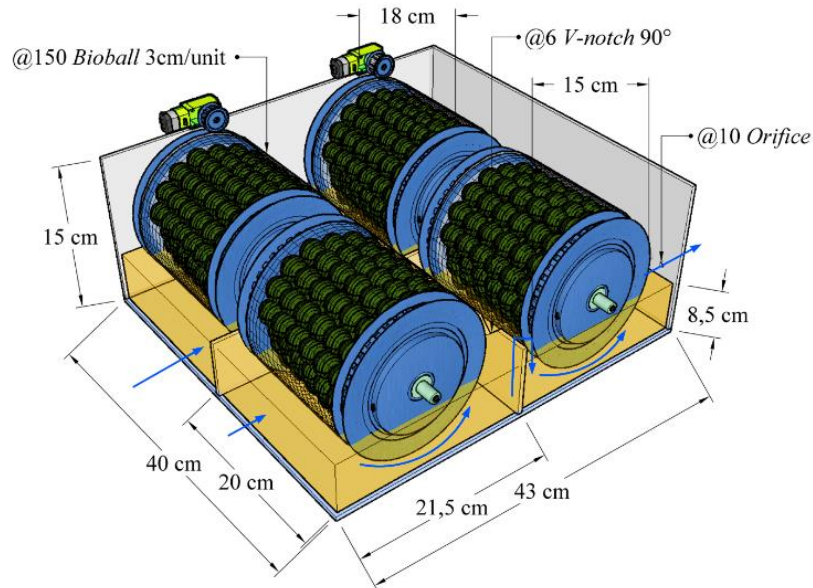
Reaktor modifikasi RBC dirancang sebanyak empat unit dan terdiri atas dua *train* dan dua *stage* (Gambar 1). RBC dioperasikan secara aerobik tanpa aerator dengan kerangka cakram berdiameter 15 cm dan diisi dengan *bioball* berdiameter 3 cm sebanyak 150 buah untuk setiap unit sebagai media pelekak mikroorganisme. Unit RBC dilengkapi dengan motor *gearbox* sebagai penggerak RBC dan *time delayer* sebagai pengatur kecepatan rotasi. Unit RBC terbuat dari akrilik dengan kapasitas 13,5 L sehingga diperoleh dimensi panjang sebesar 0,43 m; lebar sebesar 0,4 m; dan tinggi sebesar 0,15 m. Reaktor juga dilengkapi *weir* sebagai pemisah *stage* dengan bukaan *v-notch* dengan sudut 90° sebanyak 6 buah (Gambar 1). *Weir* dan *v-notch* berfungsi untuk memisahkan dan melimpahkan aliran dari rangkaian *stage* RBC pertama menuju *stage* selanjutnya. Pada efluen unit RBC, *baffle* dipasang dan dilengkapi dengan *orifice* sebanyak 10 buah.

Sampel penelitian ini diambil dari LCKS PT. Perkebunan Nusantara (PTPN) VIII, Cigudeg, Kabupaten Bogor, sedangkan biomassa diambil dari unit pengolahan air limbah biologis *Wastewater Treatment Plant* (WWTP) II Kawasan Industri Jababeka, Bekasi, sebagai komponen kultur campuran utama untuk proses biodegradasi LCKS. Standar pengambilan sampel air limbah mengikuti acuan SNI 6989.59:2008 tentang Metode Pengambilan Contoh Air Limbah. LCKS diambil sebulan sekali selama penelitian dilakukan. Pelaksanaan simulasi pengolahan LCKS melalui unit modifikasi RBC dilakukan di Laboratorium Kualitas Air, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor.

Penggunaan alat dan bahan sebagai komponen pengujian kualitas LCKS disesuaikan berdasarkan SNI 6989.2:2009 tentang Metode Pengujian Kebutuhan Oksigen Kimiawi (COD) dengan Refluks Tertutup Secara Spektrofotometri, SNI 06-6989.3-2004 tentang Cara Uji Padatan Tersuspensi Total (Total Suspended Solid, TSS) Secara Gravimetri, serta SNI 6989.06:2005 tentang Cara Uji Kadar Amonia dengan Spektrofotometer Secara Fenat. Parameter COD, TSS, amonia (NH₃), dan pH ditentukan sebagai parameter pemantauan harian untuk seluruh variasi perlakuan, sedangkan parameter lain, seperti BOD, nitrogen, nitrat (NO₂), dan total fosfor, hanya dianalisis saat pengukuran karakteristik awal LCKS. Proses filtrasi untuk separasi padatan dilakukan pada sampel sehingga parameter COD teridentifikasi menjadi soluble chemical oxygen demand (SCOD).

2.2. Prosedur Simulasi Pengolahan

Penelitian ini terbagi menjadi beberapa tahap penelitian, yaitu *seeding*, aklimatisasi, dan pengoperasian reaktor melalui penambahan *bioball* pada unit RBC berdasarkan pengaruh variasi laju kecepatan rotasi. Penelitian ini difokuskan pada tiga skenario variasi kecepatan rotasi RBC, yaitu 3, 5, dan 8 rpm. Variasi tersebut telah disesuaikan dengan kriteria desain kecepatan rotasi RBC berkisar 1 – 10 rpm (Waqas *et al.*, 2023). Waktu detensi atau *hydraulic retention time* (HRT) dijalankan konstan selama satu hari sehingga diperoleh debit pompa sebesar 0,6 L/jam untuk volume unit sebesar 14 L. Waktu detensi relatif lama karena LCKS membawa beban polutan organik yang sangat tinggi sehingga proses pengoperasian dilakukan melalui kombinasi antara tipe *attached growth* pada RBC dan *suspended growth* pada media tersuspensi saat perendaman cakram sebesar 40%. Reaktor ini dioperasikan pada temperatur ruang antara 27 – 30 °C. Pengambilan sampel dilakukan pada dua titik, yaitu influen dan efluen unit modifikasi RBC untuk analisis kualitas air berdasarkan parameter COD, TSS, dan pH. Setiap satu variasi kecepatan rotasi dilakukan pengambilan sampel setiap hari selama periode satu minggu.



Gambar 1. Konfigurasi Unit Modifikasi RBC

Proses pengembangbiakan mikroorganisme (*seeding*) dilakukan untuk menambah jumlah populasi mikroorganisme. *Seeding* dilakukan dengan cara penambahan glukosa secara kontinu sebagai substrat ke dalam biomassa. Pemberian glukosa disesuaikan dengan rasio *food/mikroorganism* (F/M) sebesar 0,4 agar sumber karbon tercukupi sebagai pasokan energi mikroorganisme. Pada proses *seeding* ini, lapisan biofilm akan mulai terbentuk dan menyelimuti media *bioball*. Selanjutnya, aklimatisasi dilakukan untuk proses adaptasi mikroorganisme terhadap LCKS sebagai substrat utama melalui pengurangan glukosa secara perlahan sebagai substrat buatan. Proses aklimatisasi dilaksanakan selama 64 hari. Perbandingan antara LCKS dan glukosa pada tahap awal sebesar 25:75 dan 50:50 dengan target konsentrasi SCOD rencana sebesar 2500 mg/L. Proses aklimatisasi tahap selanjutnya dilakukan selama 34 hari dengan perbandingan antara LCKS dan glukosa sebesar 75:25 dan 100:0 (tanpa glukosa) untuk target konsentrasi SCOD rencana sebesar 5000 mg/L. Lapisan biofilm sebagai matriks pertumbuhan mikroorganisme terus bertambah tebal sehingga mikroorganisme dalam bentuk biomassa telah melekat pada permukaan *bioball* dan siap untuk digunakan.

2.3. Analisis Kinerja Pengolahan

Analisis kinerja pengolahan menggunakan unit modifikasi RBC melibatkan penilaian efisiensi pengolahan melalui perbandingan konsentrasi parameter terukur pada influen dan efluen. Pernyataan tersebut dapat diformulasikan dalam bentuk Persamaan (1) ketika C_i direpresentasikan konsentrasi parameter uji influen (dalam mg/L) dan C_e direpresentasikan konsentrasi parameter uji efluen (dalam mg/L). Melalui perhitungan efisiensi, efektivitas proses pengolahan dapat diketahui di dalam mengurangi konsentrasi polutan LCKS dari

influen ke efluen. Selain itu, nilai efisiensi akan memberikan data empiris di dalam pengembangan desain dan pengolahan, serta memastikan efluen yang dihasilkan dapat memenuhi standar dan regulasi lingkungan sehingga tidak mencemari lingkungan.

$$\text{Efisiensi (\%)} = \left(\frac{C_i - C_e}{C_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Limbah Cair Kelapa Sawit

LCKS sangat berbahaya apabila disalurkan atau dibuang ke media air tanpa melalui proses pengolahan. Berdasarkan hasil pengujian karakteristik baku LCKS dari PTPN VIII Cigudeg, konsentrasi SCOD, *soluble biochemical oxygen demand* (SBOD), TSS, total nitrogen, dan pH masih belum memenuhi standar baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 Lampiran III tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha atau Kegiatan Industri Minyak Sawit. Konsentrasi SCOD, SBOD, TSS, total nitrogen dan pH berturut-turut sebesar 23.067 mg/L, 16.959 mg/L, 24.327 mg/L, 289 mg/L dan 3,15 (Tabel 1). Pada Tabel 1, seluruh parameter terukur memiliki nilai konsentrasi yang jauh melampaui nilai baku mutu sehingga menghasilkan kandungan bahan organik yang tinggi, kecuali amonia (NH₃), nitrat (NO₂), dan total fosfor. Ketiga parameter tersebut belum ditemukan nilai standar baku mutu pada regulasi tersebut. Konsentrasi total fosfor diidentifikasi sangat rendah sebesar 0,06 mg/L (Tabel 1). Hal ini diakibatkan oleh proses produksi minyak kelapa sawit yang melibatkan pemisahan dan pemurnian tandan buah kelapa sawit (TBS). Pada tahap ini, sebagian besar fosfor terikat dalam fraksi padatan yang tertinggal di dalam tandan sehingga konsentrasi fosfor menjadi sangat rendah ketika berada pada fase cairan LCKS.

Tabel 1. Perbandingan Karakteristik LCKS dan Baku Mutu

Parameter	Unit	Konsentrasi	
		LCKS	Baku mutu*
COD	mg/L	23.067	350
BOD	mg/L	16.959	100
TSS	mg/L	24.327	250
Total nitrogen	mg/L	289	50
Amonia	mg/L	4,72	-
Nitrat	mg/L	12,1	-
Total fosfor	mg/L	0,06	-
pH	-	3,15	6-9

*Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 Lampiran III tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha atau Kegiatan Industri Minyak Sawit.

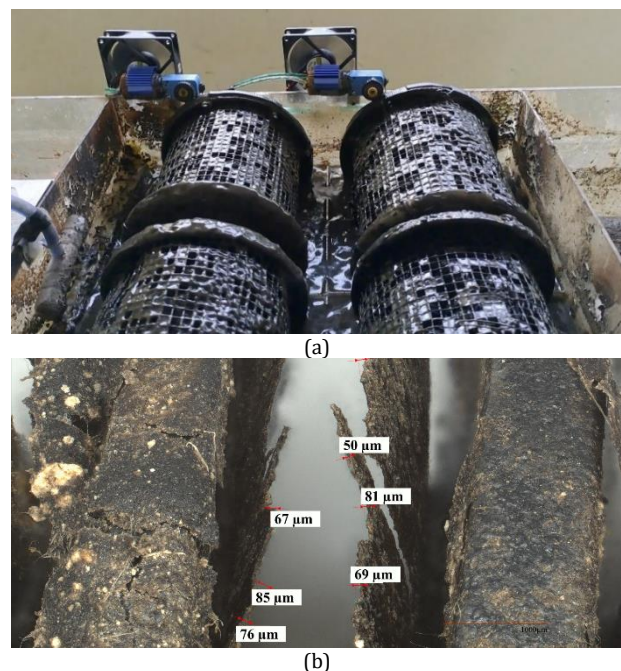
RBC mempunyai kemampuan untuk mengolah konsentrasi SBOD, TSS, dan SCOD, tetapi terdapat batasan untuk mengolah LCKS pada konsentrasi tinggi. Konsentrasi LCKS yang sangat tinggi menyebabkan kelebihan beban organik di dalam unit RBC sehingga menciptakan efek toksik terhadap pertumbuhan mikroorganisme. Konsentrasi TSS yang tinggi juga dapat menyebabkan akumulasi lumpur berlebih pada media tersuspensi RBC sehingga menghambat kontak antara mikroorganisme dan air limbah dan mengurangi efisiensi penyisihan bahan organik LCKS. Oleh karena itu, konsentrasi LCKS awal perlu disesuaikan untuk memberikan kondisi optimum untuk proses biodegradasi. Pada penelitian ini, LCKS pada influen unit modifikasi RBC disesuaikan pada konsentrasi sebesar 3000 – 5400 mgSCOD/L dan 1400 – 6400 mgTSS/L, dengan kisaran pH pada rentang 3,3 – 4,7. Nilai konsentrasi SBOD dan total nitrogen tidak dianalisis karena bukan parameter pemantauan harian. Dengan demikian, unit modifikasi RBC direncanakan untuk menyisihkan parameter SCOD sebesar 93,6%; dan TSS sebesar 96,1%; pada rentang pH 6 – 9 sehingga dapat memenuhi standar baku mutu.

3.2. Kondisi Fisik Unit saat Pengoperasian

Reaktor modifikasi RBC dioperasikan selama 108 hari pada periode penelitian. Gambar 2(a) memperlihatkan kondisi reaktor modifikasi RBC saat mengolah LCKS. Selama periode pengoperasian, biofilm telah tumbuh pada dua *train* RBC. Pertumbuhan lapisan biofilm pada *bioball* unit RBC diawali melalui interaksi fisik antara sel-sel mikroorganisme dan permukaan media. Setelah penempelan awal, mikroorganisme pada lapisan biofilm mulai berkembang dan membentuk koloni kecil sebagai pusat pertumbuhan awal biofilm. Mikroorganisme ini melekat pada media biologis menggunakan polisakarida ekstraseluler (Xiong & Liu, 2010). Selanjutnya, koloni mikroorganisme dalam biofilm terus tumbuh dan berkembang. Sel-sel mikroorganisme bereproduksi secara asexual dan membentuk populasi yang lebih besar. Pertumbuhan biofilm ini mungkin terjadi secara *unidirectional* atau *multidirectional*, bergantung pada arah putaran RBC (García-Jiménez et al., 2021). Pada tahap ini, lapisan

biofilm secara fisik berwarna keabu-abuan, tebal, dan berbentuk seperti agar-agar (Gambar 2(a)).

Tahap pembentukan biofilm terjadi ketika biofilm mengalami perkembangan struktur tiga dimensi yang kompleks. Mikroorganisme yang terikat pada permukaan media biologis *bioball* akan saling berinteraksi dan membentuk matriks ekstraseluler yang terdiri atas polisakarida, protein, dan bahan organik lainnya (Xiong & Liu, 2010). Pada tahap ini, biofilm akan berwarna kecoklatan (Gambar 2(b)). Ketebalan lapisan biofilm bervariasi tergantung dari kekuatan struktural biofilm untuk membentuk saluran-saluran yang memungkinkan aliran air limbah sebagai substrat dan akses nutrisi masuk ke dalam lapisan. Selain itu, faktor beban organik menentukan ketebalan biofilm saat awal fase pembentukan atau saat proses utilisasi substrat berlangsung. Ketebalan biofilm aktif pada *bioball* berkisar antara 50 – 85 µm (Gambar 2(b)). Pada tahap akhir, biofilm mencapai tingkat kematangan yang lebih tinggi. Mikroorganisme dalam biofilm mengoptimalkan kehidupan bersama dan saling berkolaborasi untuk proses utilisasi air limbah yang masuk. Biofilm matang memiliki kepadatan sel yang tinggi dan beragam jenis mikroorganisme yang saling berinteraksi secara simbiotik. Pada tahap ini, biofilm akan dapat terkelupas dan mengendap di dasar unit RBC. Pada beban hidraulik dan organik yang kecil dibandingkan kapasitas desain, unit modifikasi RBC dapat mengalami gangguan dari kehadiran organisme lain, seperti cacing kecil, yang dapat hidup dan berkembang di dalam reaktor (Said, 2017). Kondisi ini terjadi karena ketersediaan substrat yang cukup dan kondisi lingkungan yang stabil sehingga populasi organisme lain ikut berkembang (Spasov et al., 2020).



Gambar 2. Reaktor Modifikasi RBC: saat (a) Kondisi Pengoperasian (b) Biofilm *Bioball*

3.3. Kinerja Unit Modifikasi RBC

Variasi kecepatan rotasi pada unit modifikasi RBC memengaruhi kinerja pengolahan untuk mengutilisasi beban bahan organik LCKS. Nilai konsentrasi SCOD influen berkisar 3009 – 5395 mg/L dapat diturunkan menjadi 654 – 2591 mg/L (Tabel 2 dan Gambar 3). Fluktuasi nilai SCOD (termasuk TSS dan amonia (Gambar 4 dan Gambar 5)) influen selama simulasi unit modifikasi RBC disebabkan oleh variabilitas alami dari LCKS, kondisi operasional sistem RBC, dan metode analisis yang dilakukan.

Tabel 2. Karakteristik LCKS terhadap Variasi Kecepatan

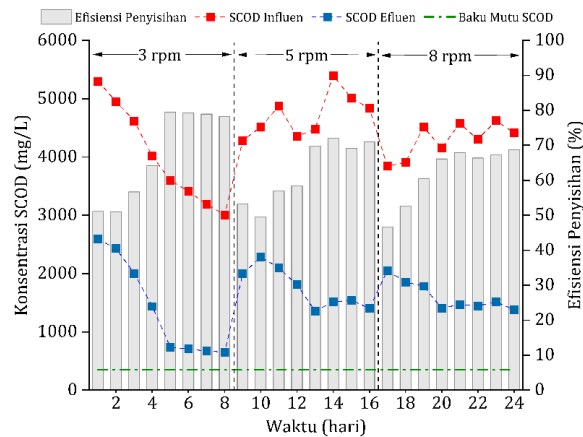
Kec. rotasi	Titik sampel	Konsentrasi rata-rata ± SD* (mg/L)	Efisiensi penyisihan
SCOD			
3	Influen	4011 ± 855	67,4%
	Efluen	1402 ± 832	
5	Influen	4718 ± 378	62,5%
	Efluen	1751 ± 348	
8	Influen	4292 ± 299	62%
	Efluen	1613 ± 249	
TSS			
3	Influen	3464 ± 112	92,4%
	Efluen	263 ± 16	
5	Influen	1548 ± 105	76,5%
	Efluen	363 ± 36	
8	Influen	5950 ± 251	66%
	Efluen	2025 ± 276	
NH₃			
3	Influen	5,4 ± 1,18	73%
	Efluen	1,47 ± 0,45	
5	Influen	2,21 ± 0,66	68,4%
	Efluen	0,71 ± 0,28	
8	Influen	4,09 ± 1,59	68%
	Efluen	1,33 ± 0,55	
pH			
3	Influen	3,64 ± 0,18	-
	Efluen	4,49 ± 0,19	
5	Influen	3,76 ± 0,35	-
	Efluen	5,51 ± 0,38	
8	Influen	3,86 ± 0,48	-
	Efluen	6,45 ± 0,24	

*Standar deviasi

Variasi dalam komposisi LCKS, perubahan kondisi lingkungan, aktivitas biologis, serta metode pengambilan sampel dan pengaturan percobaan semuanya berkontribusi pada fluktuasi konsentrasi bahan organik di influen unit. Berdasarkan kisaran konsentrasi tersebut, efisiensi penyisihan SCOD pada setiap variasi kecepatan rotasi 3, 5, dan 8 rpm dihasilkan berturut-turut sebesar 67,4%; 62,5%; dan 62% (Tabel 2) dari Persamaan (1). Efisiensi penyisihan tertinggi diperoleh saat RBC dioperasikan pada kecepatan rotasi 3 rpm, sedangkan efisiensi penyisihan SCOD terendah dihasilkan kecepatan rotasi 8 rpm. Fluktuasi konsentrasi SCOD efluen menunjukkan tren peningkatan ketika kecepatan rotasi ditingkatkan dari 3 rpm menuju 8 rpm (Gambar 3). Hasil ini berbeda jika dibandingkan dengan penelitian lain ketika peningkatan kecepatan rotasi RBC akan meningkatkan ketersediaan oksigen terlarut untuk proses biodegradasi substrat oleh mikroorganisme (Khondabi et al., 2019; Waqas & Bilal, 2019).

Pilihan antara kecepatan rotasi rendah atau tinggi untuk RBC bergantung pada beberapa faktor, seperti karakteristik limbah, target efisiensi pengolahan, penggunaan energi dan ketersediaan sumber daya (Marquez et al., 2022). Kedua pendekatan tersebut memiliki kelebihan dan kelemahan masing-masing. Kecepatan rotasi rendah pada RBC umumnya lebih efektif untuk pengolahan limbah dengan kandungan bahan organik dan padatan tersuspensi yang tinggi, seperti LCKS. Kecepatan rotasi rendah pada unit modifikasi RBC dengan media *bioball* sebesar 3 rpm memang menghasilkan pergerakan air yang lebih lambat di sekitar media biofilm. Hal tersebut mengurangi transfer oksigen dari udara ke air sehingga konsentrasi oksigen terlarut mungkin lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan rotasi yang lebih tinggi. Namun, keuntungan utama dari kecepatan rotasi rendah dalam konteks ini adalah peningkatan waktu kontak dan stabilitas biofilm (Bicelli et al., 2023). Stabilitas matriks biofilm adalah faktor kunci dalam efisiensi penguraian bahan organik, seperti SCOD. Pada kecepatan rotasi yang lebih rendah, seperti 3 rpm, biofilm pada *bioball* lebih stabil karena gaya *shear* yang lebih rendah (Sfetsas et al., 2021). Biofilm yang lebih stabil dan waktu kontak yang lebih lama memungkinkan pembentukan biofilm yang lebih tebal dan lebih efektif dalam melakukan proses metabolisme bahan organik, meskipun ketersediaan oksigen terlarut sedikit lebih rendah. Akibatnya, proses biodegradasi bahan organik menjadi lebih optimal yang ditunjukkan dengan efisiensi penguraian SCOD menjadi lebih besar (Cortez et al., 2013; Shahot et al., 2014).

Unit modifikasi RBC dapat menurunkan konsentrasi awal TSS sebesar 1400 – 6400 mg/L menjadi 240 – 2400 mg/L (Tabel 2 dan Gambar 4). Efisiensi penyisihan TSS pada setiap variasi kecepatan rotasi 3, 5, dan 8 rpm diperoleh berturut-turut sebesar 92,4%; 76,5%; dan 66% (Tabel 2) berdasarkan Persamaan (1). Hasil tersebut membuktikan adanya pengaruh kecepatan rotasi RBC terhadap efisiensi penyisihan TSS. Kinerja optimum penyisihan TSS dihasilkan ketika unit modifikasi RBC dioperasikan dengan kecepatan rotasi terendah sebesar 3 rpm (Gambar 4). Kecepatan rotasi yang lebih rendah dapat menghasilkan penurunan TSS optimum karena waktu kontak antara biofilm dan LCKS akan lebih lama serta mengurangi risiko pengelupasan lapisan biofilm sebagai media yang efektif dalam penyisihan TSS. Hal tersebut memungkinkan reaksi biokimia yang terlibat dalam pengolahan limbah, seperti proses pengendapan dan penguraian padatan berlangsung lebih efektif. Jangka waktu yang lebih lama membuat biofilm memiliki kesempatan lebih banyak untuk menangkap, mengikat, dan menguraikan padatan terlarut dalam LCKS (Mohamed et al., 2022).



Gambar 3. Kinerja Modifikasi RBC untuk Parameter SCOD

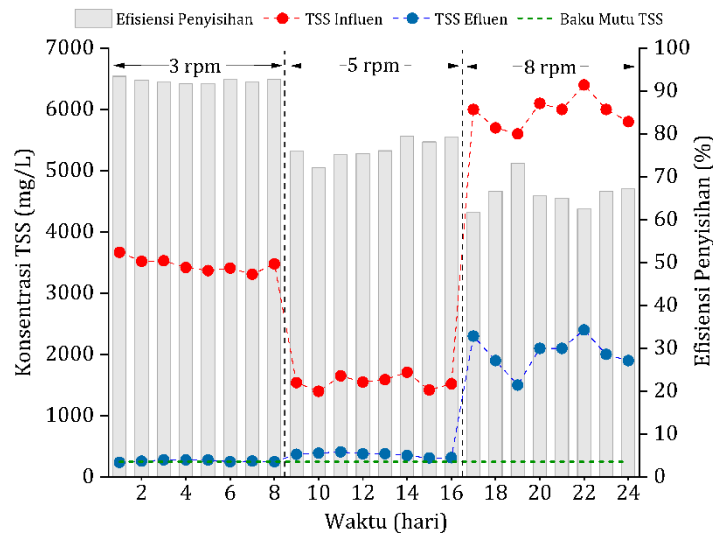
Kecepatan rotasi unit modifikasi RBC yang lebih rendah membuat lingkungan lebih kondusif bagi pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme aerob. Mikroorganisme aerob dengan waktu kontak yang lebih lama memiliki lebih banyak waktu untuk melakukan dekomposisi dan mempercepat aglomerasi padatan (Mohameda et al., 2022). Selain itu, ketika kecepatan rotasi rendah, gaya sentrifugal yang dihasilkan oleh RBC tidak cukup kuat untuk mencegah pengendapan partikel padat. Sebagai hasilnya, partikel padat dalam LCKS cenderung lebih mudah terendapkan ke dasar RBC dan mengurangi konsentrasi TSS secara signifikan (Septriani et al., 2021). Kecepatan rotasi yang sangat rendah pada unit modifikasi RBC dengan media *bioball* tidak menghilangkan efek transfer oksigen. Proses transfer oksigen secara langsung terjadi akibat kontak antara biofilm dan udara daripada melalui fase air. Dalam proses perputaran RBC, sistem dengan cepat mencapai kondisi stasioner antara fase tercelup dan fase aerasi sehingga periode transisi dapat diabaikan dan diasumsikan bahwa transfer oksigen secara sempurna terhenti saat peralihan fase (Rahmadi & Kurniawan, 2023). Namun, kecepatan rotasi rendah memastikan stabilitas biofilm yang lebih baik dan memungkinkan mikroorganisme di permukaan biofilm memanfaatkan oksigen dengan lebih efisien sehingga mendukung proses biodegradasi bahan organik yang berkelanjutan.

Pada modifikasi RBC, operasi unit dijalankan pada temperatur ruang dengan kisaran antara 27 hingga 30 °C. Temperatur ini relatif stabil dan optimal bagi banyak mikroorganisme yang terlibat dalam proses biodegradasi. Peningkatan temperatur lingkungan eksternal sistem dapat memiliki dampak signifikan pada kelarutan oksigen dalam air. Secara umum, kelarutan oksigen dalam air menurun seiring dengan peningkatan temperatur (Zhang et al., 2014). Hal tersebut diakibatkan molekul air yang lebih hangat memiliki energi kinetik yang lebih tinggi sehingga oksigen lebih mudah terlepas ke udara (Boehrer et al., 2017). Dalam konteks unit modifikasi RBC, penurunan kelarutan oksigen akibat peningkatan

temperatur lingkungan eksternal dapat mengurangi efisiensi transfer oksigen ke biofilm.

Meskipun peningkatan temperatur lingkungan eksternal dapat mengurangi kelarutan oksigen dalam air, perubahan temperatur motor RBC atau komponen mekanis lainnya tidak memengaruhi temperatur proses pengolahan LCKS. Sistem batasan (*boundary*) yang terpisah dan mekanisme pendinginan yang lebih efisien akan menjaga temperatur proses pengolahan tetap stabil untuk memastikan bahwa efisiensi pengolahan LCKS tidak terganggu oleh peningkatan temperatur operasi motor atau kecepatan rotasi. Kondisi ini memungkinkan unit modifikasi RBC tetap efektif dalam menguraikan bahan organik pada unit modifikasi LCKS, meskipun terdapat variasi dalam kondisi temperatur eksternal.

Konsentrasi karakteristik awal amonia LCKS relatif kecil sebesar 4,72 mg/L (Tabel 1). Walaupun konsentrasinya kecil, parameter ini harus terus dianalisis untuk dapat memberikan informasi tentang tingkat nitrogen di dalam LCKS. Konsentrasi amonia pada unit modifikasi RBC dapat direduksi dari konsentrasi awal sebesar 1,28 – 6,71 mg/L menjadi 0,29 – 1,93 mg/L (Tabel 2 dan Gambar 5). Proses degradasi amonia tersebut menunjukkan bahwa proses dekomposisi bahan organik masih berlangsung sempurna dalam LCKS. Efisiensi penyisihan amonia berdasarkan variasi kecepatan rotasi 3, 5, dan 8 rpm dihasilkan berturut-turut sebesar 72,9%; 68,4%; dan 68% (Tabel 2). Hasil tersebut membuktikan adanya pengaruh kecepatan rotasi RBC terhadap efisiensi penyisihan amonia. Kinerja pengolahan tertinggi dihasilkan saat kecepatan rotasi RBC dioperasikan sebesar 3 rpm. Kinerja pengolahan akan menurun saat unit modifikasi RBC dijalankan dengan kecepatan rotasi sebesar 8 rpm. Kecepatan rotasi RBC berpengaruh terhadap aktivitas mikroorganisme aerob yang terlibat dalam pengolahan LCKS. Saat kecepatan rotasi RBC rendah, proses nitrifikasi dan denitrifikasi terjadi lebih efektif untuk mengurangi konsentrasi amonia (Wang et al., 2022).



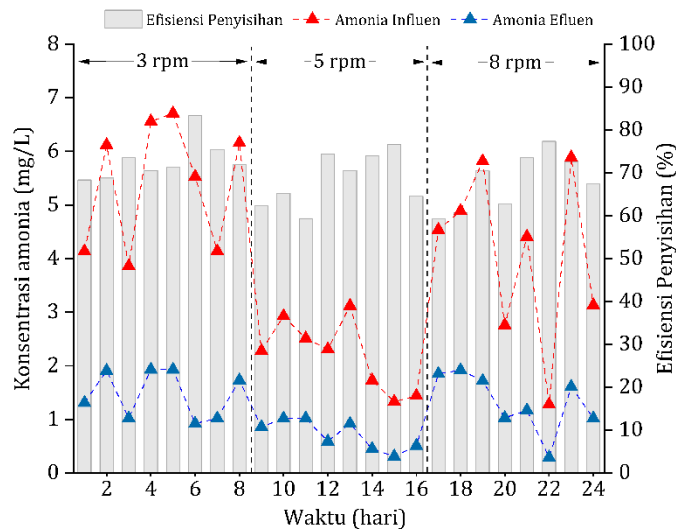
Gambar 4. Kinerja Modifikasi RBC untuk Parameter TSS

Mikroorganisme aerob dapat mengoksidasi amonia menjadi senyawa yang lebih sederhana, seperti nitrat (NO_2) dan nitrat (NO_3) melalui proses nitrifikasi. Proses nitrifikasi melibatkan serangkaian reaksi enzimatik yang dijalankan oleh mikroorganisme di dalam lapisan biofilm (Chaali et al., 2018). Seiring dengan waktu detensi unit modifikasi RBC yang lebih lama selama satu hari, mikroorganisme memiliki lebih banyak kesempatan untuk mengoksidasi amonia sehingga konsentrasi amonia dapat berkurang. Selain itu, biofilm pada permukaan media *bioball* memiliki kemampuan adsorpsi terhadap amonia. Ion amonia (NH_4^+) dapat terikat ke permukaan biofilm melalui interaksi elektrostatis atau adsorpsi fisik (Fulazzaky et al., 2022). Dengan waktu detensi relatif lebih lama saat kecepatan rotasi diperlambat, peningkatan interaksi antara permukaan biofilm dan senyawa amonia akan meningkatkan mekanisme proses oksidasi sehingga terjadi penurunan konsentrasi amonia dalam LCKS.

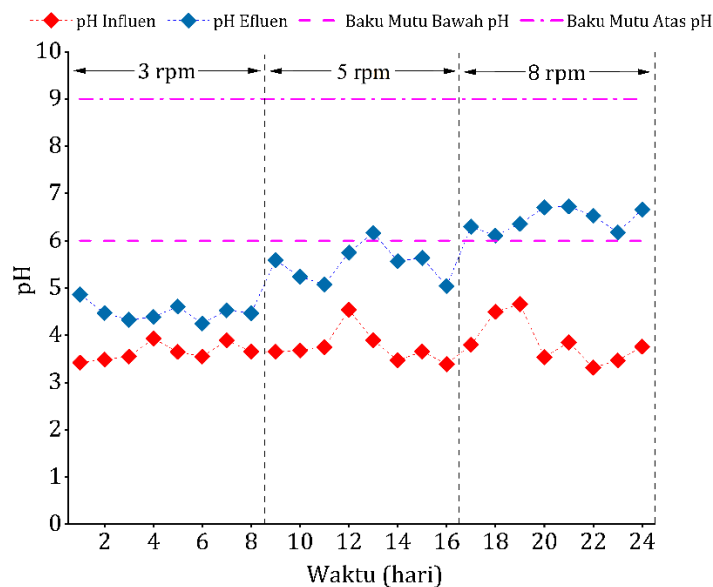
Ketidaksesuaian nilai pH dapat memengaruhi kemampuan mikroorganisme di dalam mekanisme proses utilisasi bahan organik, degradasi senyawa toksik, atau proses biokimia di dalam sel mikroorganisme (Irfan et al., 2022). Secara umum, unit modifikasi RBC mampu mengondisikan nilai pH awal sebesar 3,32 – 4,66 untuk mendekati nilai pH netral sebesar 4,25 – 6,73 (Tabel 2 dan Gambar 6). Berdasarkan kinerja unit modifikasi RBC, nilai pH rata-rata efluen pada variasi kecepatan rotasi 3, 5 dan 8 rpm dihasilkan berturut-turut sebesar 4,49; 5,51; dan 6,45 (Tabel 2). Nilai tersebut memberikan informasi bahwa pH akan mendekati nilai netral apabila dijalankan pada kecepatan rotasi yang lebih cepat hingga 8 rpm. Saat unit modifikasi RBC dioperasikan pada kecepatan rotasi sebesar 8 rpm,

nilai pH LCKS efluen dapat memenuhi baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah pada rentang nilai 6 – 9 (Tabel 1). Namun, nilai pH saat kecepatan rotasi RBC 3 dan 5 rpm masih belum memenuhi baku mutu karena masih bersifat asam.

Pada kecepatan rotasi yang rendah, tingkat aerasi dalam sistem pengolahan dapat berkurang. Berkurangnya oksigen menyebabkan akumulasi asam organik yang dihasilkan oleh mikroorganisme pada proses penguraian bahan organik. Akumulasi asam organik seperti asam asetat atau asam laktat dapat menurunkan pH limbah secara signifikan (Mazareli et al., 2021). Selain itu, kecepatan rotasi RBC yang rendah mengurangi penghilangan karbon dioksida (CO_2) dari sistem. Akumulasi CO_2 dalam LCKS dapat membentuk asam karbonat (H_2CO_3) yang menyebabkan penurunan pH. Bahan-bahan kimia netralisasi, seperti kapur, soda api, atau natrium bikarbonat, dapat ditambahkan ke dalam sistem RBC saat kecepatan rotasi rendah untuk menaikkan pH. Bahan-bahan tersebut akan bereaksi dengan asam dalam LCKS dan membantu menetralkan pH menjadi netral. Pada kondisi sebaliknya, kecepatan rotasi yang lebih tinggi dapat menghasilkan aerasi yang lebih intensif dalam unit modifikasi RBC. Proses aerasi melalui injeksi oksigen ke dalam LCKS akan memfasilitasi aktivitas mikroorganisme aerob untuk mengoksidasi bahan organik. Saat proses oksidasi, ion hidrogen (H^+) diperoleh sebagai hasil dari reaksi biokimia yang melibatkan oksigen dan bahan organik. Sebagai hasilnya, peningkatan konsentrasi pH dalam LCKS terjadi lebih signifikan saat kecepatan rotasi RBC tinggi (del Álamo et al., 2022).



Gambar 5. Kinerja Modifikasi RBC untuk Parameter NH_3



Gambar 6. Kinerja Modifikasi RBC untuk Parameter pH

3.4. Analisis dan Rekomendasi Integrasi Unit

RBC mempunyai limitasi di dalam mengolah konsentrasi bahan organik tinggi sehingga tidak memungkinkan untuk mengolah karakteristik awal LCKS pada Tabel 1. Oleh karena itu, penyesuaian konsentrasi SCOD dan TSS dilakukan untuk membatasi input bahan organik ke dalam mekanisme biologis RBC. Berdasarkan hasil kinerja unit modifikasi RBC, konsentrasi optimum SCOD efluen pada kecepatan rotasi 3 rpm sebesar 654 – 2591 mg/L (Tabel 2). Kisaran ini belum memenuhi baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 Lampiran III tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha atau Kegiatan Industri Minyak Sawit sebesar 350 mg/L karena efisiensi penyisihan optimum hanya mencapai 67,4% (Tabel 1 dan Tabel 2). Dengan demikian, beberapa

solusi perlu dilakukan ketika unit modifikasi RBC diimplementasikan pada skala lapangan, antara lain:

- Optimalisasi kondisi operasional RBC, seperti temperatur, pH, aerasi, serta menjaga kestabilan biofilm dan memastikan ketersediaan nutrisi yang cukup untuk pertumbuhan mikroorganisme. Pengendalian temperatur secara teratur sangat penting dalam menjaga kinerja optimal RBC. Sistem pemanasan atau pendinginan dapat digunakan untuk mempertahankan temperatur yang sesuai dalam unit RBC. Walaupun RBC dapat dijalankan tanpa aerator, alat ini dapat digunakan pada kondisi waktu detensi yang relatif lebih panjang untuk mencegah kondisi anaerobik.
- Pada konsentrasi LCKS yang tinggi, penambahan unit pra-pengolahan sangat direkomendasikan sebelum limbah masuk ke dalam unit RBC. Unit pra-pengolahan seperti koagulasi-flokulasi dan

dilengkapi sedimentasi primer dapat membantu mengurangi beban SCOD dan TSS pada unit modifikasi RBC. Solusi lain dapat berupa penambahan tipe pengolahan *attached growth* aerobik melalui tipikal media yang berbeda, seperti media sarang tawon (*honeycomb*), efektif untuk meningkatkan efisiensi pengolahan LCKS.

- c. Jika konsentrasi SCOD dan TSS masih belum memenuhi baku mutu setelah melalui unit pra-pengolahan dan modifikasi RBC, pengolahan lanjutan berupa proses aerobik atau anaerobik tambahan, filter pasir, atau proses membran dapat digunakan untuk menyisihkan SCOD dan TSS yang tersisa dalam LCKS. Dengan pengolahan lanjutan ini, efisiensi pengolahan dapat dicapai lebih optimum dan memenuhi baku mutu yang ditetapkan.

Pilihan antara unit pra-pengolahan atau pengolahan lanjutan bergantung pada karakteristik LCKS, tingkat pencemaran, dan persyaratan baku mutu yang harus dipenuhi. Dalam beberapa kasus, kombinasi dari kedua solusi tersebut diperlukan untuk mencapai pengolahan yang efektif dan memenuhi ketetapan baku mutu.

3.5. Implementasi Optimalisasi Variasi Rotasi RBC pada Skala Lapangan

Berdasarkan hasil simulasi laboratorium, implementasi optimalisasi variasi rotasi pada unit modifikasi RBC menggunakan *bioball* untuk pengolahan LCKS pada skala lapangan melibatkan pendekatan sistematis dan berbasis data. Langkah pertama dalam proses ini adalah melakukan karakterisasi menyeluruh terhadap limbah cair kelapa sawit, termasuk analisis parameter penting seperti BOD, COD, TSS, amonia, dan parameter lain sesuai standar baku mutu. Informasi ini menjadi dasar dalam menentukan kondisi operasional awal, termasuk kecepatan rotasi RBC, yang umumnya dimulai pada tingkat moderat sekitar 3 rpm. Kecepatan ini dipilih untuk memastikan formasi biofilm yang stabil dan tebal untuk proses biodegradasi yang efektif.

Selanjutnya, sistem RBC dipantau secara berkelanjutan. Pemantauan ini mencakup pengukuran parameter kualitas bahan organik LCKS di effluen unit. Pengukuran dilakukan secara berkala untuk mendapatkan data yang akurat mengenai kinerja pengolahan. Berdasarkan analisis data ini, jika ditemukan bahwa konsentrasi oksigen terlarut menurun atau efisiensi penguraian bahan organik tidak optimal, penyesuaian kecepatan rotasi dilakukan. Penyesuaian ini dilakukan secara bertahap untuk mencapai keseimbangan optimal antara transfer oksigen dan stabilitas biofilm. Jika penyesuaian kecepatan rotasi tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan oksigen mikroorganisme, sistem aerasi tambahan dapat diperkenalkan walau tidak terlalu besar seperti penggunaan di pengolahan biologis tipe *suspended growth*. Aerasi tambahan ini membantu meningkatkan kelarutan oksigen tanpa

perlu meningkatkan kecepatan rotasi secara signifikan, yang dapat mengganggu stabilitas biofilm. Dalam praktiknya, penambahan aerasi difusi sering kali efektif dalam meningkatkan transfer oksigen ke biofilm sehingga mendukung proses biodegradasi yang lebih efisien.

Sepanjang implementasi, pemantauan kondisi lingkungan eksternal seperti suhu dan pH juga sangat penting, karena faktor-faktor ini dapat memengaruhi aktivitas mikroorganisme dalam biofilm. Untuk mengatasi fluktuasi suhu lingkungan, langkah-langkah seperti HRT atau penambahan penutup isolasi pada RBC dapat diterapkan untuk mempertahankan kondisi operasi yang optimal. Pada kondisi tertentu berdasarkan beban organik LCKS yang tinggi, unit modifikasi RBC dapat dioperasikan pada kondisi anoksik atau anaerobik sehingga tidak membutuhkan adanya tambahan pengolahan awal dan lanjutan.

Proses iteratif ini melibatkan siklus pengaturan dan pemantauan yang berkelanjutan ketika data yang dikumpulkan terus digunakan untuk menyempurnakan kecepatan rotasi dan parameter operasional lainnya. Dokumentasi yang tepat dari semua pengukuran, penyesuaian, dan hasil analisis sangat penting untuk evaluasi lebih lanjut untuk memastikan bahwa sistem dapat dioptimalkan secara berkelanjutan. Dengan pendekatan ini, unit modifikasi RBC dengan *bioball* dapat mencapai efisiensi pengolahan yang tinggi sehingga memastikan bahwa sistem beroperasi secara berkelanjutan dan sesuai dengan standar lingkungan yang berlaku. Proses ini tidak hanya meningkatkan efektivitas penguraian bahan organik dalam LCKS, tetapi juga memastikan bahwa sistem pengolahan LCKS dapat beradaptasi dengan perubahan dalam kondisi operasional dan karakteristik LCKS.

4. KESIMPULAN

Penggunaan *bioball* sebanyak 150 buah per unit pada modifikasi RBC berdampak positif terhadap kinerja pengolahan LCKS. Permukaan *bioball* sebagai media pertumbuhan mikroorganisme menyediakan luas area permukaan yang jauh lebih besar dibandingkan dengan RBC konvensional untuk pertumbuhan lapisan biofilm sebagai matriks ekstraseluler mikroorganisme. Laju pertumbuhan mikroorganisme akan menjadi lebih cepat sehingga meningkatkan optimalisasi proses biodegradasi bahan organik LCKS. Kombinasi antara kecepatan rotasi dan penggunaan *bioball* pada RBC menunjukkan kinerja pengolahan terbaik untuk penyisihan konsentrasi SCOD, TSS, dan NH_3 dan mampu menetralkan pH LCKS. Terkait dengan konsentrasi bahan organik LCKS yang tinggi, waktu detensi pengolahan dioperasikan relatif lebih lama selama satu hari. Oleh karena itu, kecepatan rotasi yang lebih rendah sebesar 3 rpm memberikan efisiensi penyisihan SCOD, TSS, dan NH_3 terbesar dibandingkan dengan kecepatan rotasi sebesar 5 dan 8 rpm. Kinerja optimum unit modifikasi RBC

Rahmadi, R., Nugrohoputri, A. S., Adam, M. S., Astuti, D. W., dan Kurniawan, A. (2025). Pengaruh Kecepatan Rotasi Unit Modifikasi Rotating Biological Contactor terhadap Kinerja Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(1), 73-84, doi:10.14710/jil.23.1.73-84

berdasarkan efisiensi penyisihan sebesar 67,4% SCOD; 92,4% TSS; serta 73% NH₃ ketika dioperasikan pada kecepatan rotasi 3 rpm. Kecepatan rotasi yang rendah memungkinkan lebih banyak waktu kontak antara LCKS dan permukaan biofilm mikroorganisme sehingga penyisihan bahan organik menjadi lebih optimal. Kondisi khusus perlu diperhatikan ketika nilai pH masih belum mendekati nilai netral dan RBC dioperasikan pada kecepatan rendah sehingga diperlukan bahan kimia penetralisasi pH.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih dihatorkan kepada anggota Tim Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) 2022 (Aliyah Baida Wiwiyanti, Dzaki Nauval, dan Ahmad Rijani Hasby) atas dukungan dalam pembuatan reaktor modifikasi RBC dan Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi atas dukungan hibah pendanaan pelaksanaan kegiatan PKM 2022 (No. SK. 2489/E2/KM.05.01/2022).

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, Y., Yaakob, Z., Akhtar, P., & Sopian, K. (2015). Production of biogas and performance evaluation of existing treatment processes in palm oil mill effluent (POME). In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 42, pp. 1260-1278). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.073>
- Bicelli, L. G., Giordani, A., Augusto, M. R., Okada, D. Y., Moura, R. B. de, Vich, D. V., Contrera, R. C., Cano, V., & Souza, T. S. O. de. (2023). Microbial interactions and nitrogen removal performance in an intermittently rotating biological contactor treating mature landfill leachate. *Bioresource Technology*, 389, 129797. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129797>
- Boehrer, B., von Rohden, C., & Schultze, M. (2017). *Physical Features of Meromictic Lakes: Stratification and Circulation* (pp. 15-34). https://doi.org/10.1007/978-3-319-49143-1_2
- Chaali, M., Naghdi, M., Brar, S. K., & Avalos-Ramirez, A. (2018). A review on the advances in nitrifying biofilm reactors and their removal rates in wastewater treatment. In *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* (Vol. 93, Issue 11, pp. 3113-3124). <https://doi.org/10.1002/jctb.5692>
- Chin, M. J., Poh, P. E., Tey, B. T., Chan, E. S., & Chin, K. L. (2013). Biogas from palm oil mill effluent (POME): Opportunities and challenges from Malaysia's perspective. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 26, pp. 717-726). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.008>
- Cortez, S., Teixeira, P., Oliveira, R., & Mota, M. (2013). *Encyclopedia of Industrial Biotechnology*. John Wiley & Sons Inc.
- del Álamo, A. C., Pariente, M. I., Molina, R., & Martínez, F. (2022). Advanced bio-oxidation of fungal mixed cultures immobilized on rotating biological contactors for the removal of pharmaceutical micropollutants in a real hospital wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 425, 128002. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128002>
- Fulazzaky, M. A., Salim, N. A. A., Puteh, M. H., Khamidun, M. H., Yusoff, A. R. M., Fulazzaky, M., Abdullah, N. H., & Zaini, M. A. A. (2022). Reliability of the Mass Transfer Factor Models to Describe the Adsorption of NH₄⁺

- by Granular Activated Carbon. *International Journal of Environmental Research*, 16(3). <https://doi.org/10.1007/s41742-022-00408-7>
- García-Jiménez, B., Torres-Bacete, J., & Nogales, J. (2021). Metabolic modelling approaches for describing and engineering microbial communities. In *Computational and Structural Biotechnology Journal* (Vol. 19, pp. 226-246). <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2020.12.003>
- Guadalima, M. P. G., & Monteros, D. A. N. (2018). Evaluation of the rotational speed and carbon source on the biological removal of free cyanide present on gold mine wastewater, using a rotating biological contactor. *Journal of Water Process Engineering*, 23, 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.03.008>
- Irfan, M., Waqas, S., Khan, J. A., Rahman, S., Kruszelnicka, I., Ginter-Kramarczyk, D., Legutko, S., Ochowiak, M., Włodarczyk, S., & Czernek, K. (2022). Effect of Operating Parameters and Energy Expenditure on the Biological Performance of Rotating Biological Contactor for Wastewater Treatment. *Energies*, 15(10), 3523. <https://doi.org/10.3390/en15103523>
- Israni, S. H., Koli, S. S., Patwardhan, A. W., Melo, J. S., & D'Souza, S. F. (2002). Phenol degradation in rotating biological contactors. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77(9), 1050-1057. <https://doi.org/10.1002/jctb.677>
- Khondabi, V. G., Fazlali, A. R., & Arjomandzadegan, M. (2019). Biological treatment of phenol from petroleum refinery wastewater using mixed indigenous cultures in a rotating biological contactor: Experimental and statistical studies. *Desalination and Water Treatment*, 160, 135-143. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24263>
- Krishnan, S., Md Din, M. F., Taib, S. M., Nasrullah, M., Sakinah, M., Wahid, Z. A., Kamyab, H., Chelliapan, S., Rezanian, S., & Singh, L. (2019). Accelerated two-stage bioprocess for hydrogen and methane production from palm oil mill effluent using continuous stirred tank reactor and microbial electrolysis cell. *Journal of Cleaner Production*, 229, 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.365>
- Loupasaki, E., & Diamadopoulos, E. (2013). Attached growth systems for wastewater treatment in small and rural communities: A review. In *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* (Vol. 88, Issue 2, pp. 190-204). <https://doi.org/10.1002/jctb.3967>
- Márquez, P., Gutiérrez, M. C., Toledo, M., Alhama, J., Michán, C., & Martín, M. A. (2022). Activated sludge process versus rotating biological contactors in WWTPs: Evaluating the influence of operation and sludge bacterial content on their odor impact. *Process Safety and Environmental Protection*, 160, 775-785. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.02.071>
- Mazareli, R. C. da S., Villa Montoya, A. C., Delforno, T. P., Centurion, V. B., de Oliveira, V. M., Silva, E. L., & Varesche, M. B. A. (2021). Enzymatic routes to hydrogen and organic acids production from banana waste fermentation by autochthonous bacteria: Optimization of pH and temperature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(12), 8454-8468. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.063>
- Mohamed, M. A., Fouad, H. A., & Hefny, R. M. (2022). Rotating Biological Contactor Wastewater Treatment Using Geotextiles, Sugarcane Straw and Steel Cylinder for Green Areas Irrigation. *Egyptian Journal of*

- Chemistry, 65(6), 59–72.
<https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2021.82581.4065>
- Mohameda, M. A., Fouad, H. A., & ElHefny, R. E. (2022). Reviewing Rotating Biological Contactor's Different Aspects for Wastewater Treatment with Experiment. *Engineering Research Journal - Faculty of Engineering (Shoubra)*, 51(2), 180–187.
<https://doi.org/10.21608/erjsh.2022.239936>
- Rahardjo, P. N. (2009). Studi banding teknologi pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 10(1), 9–18.
<https://doi.org/10.29122/jtl.v10i1.1498>
- Rahmadi, R., & Kurniawan, A. (2023). *Efek Variasi Kecepatan Rotasi Modifikasi Rotating Biological Contactor Terhadap Model Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit*. Institut Pertanian Bogor.
- Ramsay, J., Shin, M., Wong, S., & Goode, C. (2006). Amaranth decoloration by *Trametes versicolor* in a rotating biological contacting reactor. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 33(9), 791–795.
<https://doi.org/10.1007/s10295-006-0117-0>
- Said, N. I. (2017). *Teknologi Pengolahan Air Limbah: Teori dan Aplikasi*. Erlangga.
- Septriani, S., Prayogo, N. A., Sahri, A., & Brown, C. L. (2021). Efficiency of suspended solid removal from tofu production using Rotating Biological Contractor (RBC). *E3S Web of Conferences*, 322, 01034.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132201034>
- Sfetsas, T., Patsatzis, S., & Chioti, A. (2021). A review of 3D printing techniques for bio-carrier fabrication. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 318).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128469>
- Shahot, K., Idris, A., Omar, R., & Yusoff, H. M. (2014). Review on biofilm processes for wastewater treatment. *Life Science Journal*, 11(11), 1–13.
- Sivadon, P., Barnier, C., Urios, L., & Grimaud, R. (2019). Biofilm formation as a microbial strategy to assimilate particulate substrates. In *Environmental Microbiology Reports* (Vol. 11, Issue 6, pp. 749–764).
<https://doi.org/10.1111/1758-2229.12785>
- Soo, P. L., Bashir, M. J. K., & Wong, L. P. (2022). Recent advancements in the treatment of palm oil mill effluent (POME) using anaerobic biofilm reactors: Challenges and future perspectives. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 320, p. 115750).
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115750>
- Spasov, E., Tsuji, J. M., Hug, L. A., Doxey, A. C., Sauder, L. A., Parker, W. J., & Neufeld, J. D. (2020). High functional diversity among *Nitrospira* populations that dominate rotating biological contactor microbial communities in a municipal wastewater treatment plant. *ISME Journal*, 14(7), 1857–1872.
<https://doi.org/10.1038/s41396-020-0650-2>
- Wang, D., Wang, Y., Liu, L., Chen, Y., Wang, C., Xu, X., Yang, Y., Wang, Y., & Zhang, T. (2022). Niche differentiation and symbiotic association among ammonia/nitrite oxidizers in a full-scale rotating biological contactor. *Water Research*, 225, 119137.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119137>
- Waqas, S., & Bilad, M. R. (2019). A review on rotating biological contactors. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(2), 241–256.
<https://doi.org/10.17509/ijost.v4i2.18181>
- Waqas, S., Harun, N. Y., Sambudi, N. S., Bilad, M. R., Abioye, K. J., Ali, A., & Abdulrahman, A. (2023). A Review of Rotating Biological Contactors for Wastewater Treatment. In *Water (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 10, p. 1913).
<https://doi.org/10.3390/w15101913>
- Xiao, R., Wei, Y., An, D., Li, D., Ta, X., Wu, Y., & Ren, Q. (2019). A review on the research status and development trend of equipment in water treatment processes of recirculating aquaculture systems. In *Reviews in Aquaculture* (Vol. 11, Issue 3, pp. 863–895).
<https://doi.org/10.1111/raq.12270>
- Xiong, Y., & Liu, Y. (2010). Biological control of microbial attachment: A promising alternative for mitigating membrane biofouling. In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 86, Issue 3, pp. 825–837).
<https://doi.org/10.1007/s00253-010-2463-0>
- Yulastri, Hazmi, A., & Desmiarti, R. (2013). Aplikasi Plasma Dengan Metoda Dielectric Barrier Discharge (DBD) Untuk 295 Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 2(2), 46.
<https://doi.org/10.25077/jnte.v2n2.85.2013>
- Zhang, J. hong, Lin, Q. mei, & Zhao, X. rong. (2014). The hydrochar characters of municipal sewage sludge under different hydrothermal temperatures and durations. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(3), 471–482.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60702-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60702-9)