

MODIFIKASI TRIPIKON-S DENGAN BIOBALL DAN FILTER IJUK UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH ARTIFISIAL BLACK WATER DAN DOMESTIK TERCAMPUR

ALYA KARMILIA^{1*}, NICO HALOMOAN¹, PRAYATNI SOEWONDO¹

1. Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Insitut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia

Email: alyakarmilia99@gmail.com

ABSTRAK

Tripikon-S merupakan septic tank vertikal yang terdiri dari tiga pipa konsentris septik untuk daerah spesifik. Tripikon-S memiliki efisiensi penyisihan BOD 75% dan penyisihan nutrient yang tergolong rendah sehingga diperlukan modifikasi untuk mencapai efisiensi yang lebih baik. Dilakukan modifikasi tripikon-S dengan menambahkan bioball pada pipa terluar dan filter ijuk pada outlet Tripikon-S untuk menguji kinetika pada reaktor dan kinerja reaktor dalam pengolahan limbah black water dan domestik tercampur. Seeding dan aklimatisasi dilakukan dalam kondisi batch dengan variasi beban COD 500, 750 dan 1.000 mg/L, dilanjutkan pengujian kinerja reaktor dalam kondisi kontinyu. Diperoleh μ_{max} 0,0524/jam, K_s 942,277 mg/L COD/jam, dan yield 2,571. Laju degradasi substrat (k) pada konsentrasi 500, 750 dan 1.000 mg/L diperoleh berturut-turut 0,053/jam, 0,0537/jam dan 0,0442/jam. Efisiensi penyisihan black water menunjukkan hasil yang lebih baik pada reaktor modifikasi COD 67,76% dan TSS 87,51%, hasil uji t ($p = 0,818$) mengindikasikan tidak terdapat perbedaan kinerja yang signifikan pada reaktor modifikasi dan kontrol terhadap pengolahan limbah black water. Penggunaan filter ijuk pada reaktor tripikon-S memberikan peningkatan efisiensi pada parameter COD 28,41% dan TSS 8,89%. Hasil uji ($p = 0,036$) menunjukkan tripikon-S modifikasi lebih baik digunakan dalam pengolahan limbah black water daripada limbah domestik tercampur.

Kata kunci: Tripikon-S, bioball, filter ijuk, pengolahan air limbah, black water

ABSTRACT

Tripikon-S is a vertical septic tank comprising three concentric septic pipes for specific areas, with BOD removal efficiency of 75% and low nutrient removal, so modifications are needed to achieve better efficiency. Tripikon-S was modified by adding bioballs to the outermost pipe and a coconut fiber filter to the Tripikon-S outlet to test the kinetics of the reactor and the performance of the reactor in processing mixed black water and domestic waste. Seeding and acclimatization were conducted in batch with variations in COD loads: 500, 750 and 1,000mg/L, followed by testing the reactor performance in continuous conditions. The obtained μ_{max} was 0.0524/hour, K_s 942.277mg/L COD/hour, and yield 2.571. The substrate degradation rate (k) at concentrations of 500, 750 and 1,000mg/L was obtained respectively 0.053/hour, 0.0537/hour and 0.0442/hour. The black water removal efficiency showed better in the modified reactor COD 67.76% and TSS 87.51%. The t -test results ($p=0.818$) indicated no significant difference in the modified reactor and the control for black water waste treatment performances. The coconut fiber filters in the tripikon-S reactor use increased the COD parameters efficiency of 28.41% and TSS 8.89%. The results ($p=0.036$) showed the modified tripikon-S was better used in black water waste treatment than mixed domestic waste.

Keywords: Tripikon-S, bioball, fiber filter, wastewater treatment, black water

1. PENDAHULUAN

Tripikon-S, yang merupakan singkatan dari tri (tiga) pipa konsentris septik, adalah suatu teknologi pengolahan tinja yang dibuat oleh Prof. Ir. Hardjoso Prodjopangarso yang didasarkan dan dikhususkan untuk dapat memberikan jangkauan akses sanitasi pada daerah spesifik (Rachman, 2016). Sebagaimana sesuai dengan definisinya, daerah spesifik merupakan daerah yang akibat kondisi geografis maupun iklimnya tidak dapat bahkan sulit untuk dijangkau oleh sistem pelayanan sanitasi baik konvensional maupun non konvensional. Contohnya adalah daerah rawa, sungai, daerah rawan banjir, pesisir dan daerah yang terpengaruh pasang surut (Sembiring dan Safithri, 2021). Penggunaan tripikon-S sebagai teknologi pengolah limbah domestik black water sudah diterapkan di beberapa tempat di Indonesia, seperti di Yogyakarta, Semarang, Kudus, Bengkulu, Pontianak dan Kalimantan Selatan (Waskito dkk., 2022). Tripikon-S memiliki mekanisme kerja yang sama dengan *septic tank* konvensional, yakni mekanisme pemisahan material tersuspensi dan penguraian zat organik oleh mikroorganisme. Konstruksi tripikon-S terdiri dari tiga buah pipa dengan ukuran yang berbeda-beda, dimana pipa dengan diameter paling kecil (pipa pertama) berfungsi sebagai *inlet* limbah yang diletakkan pada bagian terdalam dan dihubungkan dengan leher angsa jamban rumah tangga. Kemudian, pipa dengan diameter lebih besar (pipa kedua) terhubung langsung dengan pipa pertama berfungsi sebagai pipa tengah untuk tempat terjadinya pemisahan material tersuspensi dan penguraian oleh mikroorganisme, pada ketinggian 10-20 cm dari dasar pipa dibuat lubang-lubang berdiameter 1 cm sebagai jalan air menuju pipa ketiga. Pipa ketiga (pipa dengan diameter terbesar) ditempatkan sebagai pipa terluar yang berfungsi sebagai pipa peluap, tempat keluarnya efluen yang telah diolah (Rachman, 2016; Sardi dkk., 2020). Pengolahan biologis yang terjadi di pipa tengah merupakan proses anaerobik sebagaimana terjadi di *septic tank* konvensional, sementara pemisahan material tersuspensi terjadi pada kondisi lingkungan yang bebas dari turbulen, oleh karena itu dalam desainnya dimensi pipa tengah dan pipa terluar merupakan poin penting untuk memungkinkan terjadinya mekanisme *physical settling* dengan waktu tinggal dua hingga empat hari, sebagaimana berlaku pada *septic tank* (Maheng dkk., 2015).

Kelebihan dari konstruksi tripikon-S untuk diterapkan di daerah spesifik adalah sistem kerjanya yang vertikal sehingga tidak membutuhkan lahan yang luas, tidak diperlukannya sistem peresapan pada tanah, serta material yang digunakan mudah ditemukan dan diaplikasikan sehingga biaya investasi, operasional dan pemeliharannya rendah. Meskipun demikian, efisiensi pengolahan limbah tripikon-S lebih kecil bila dibandingkan dengan *septic tank*, khususnya pada parameter nitrogen dan fosfor (Noor & Soewondo, 2018) sehingga diperlukan modifikasi lanjutan untuk mencapai efisiensi pengolahan yang lebih baik.

Penelitian mengenai modifikasi tripikon-S terus dilakukan untuk mencapai efisiensi penyisihan limbah yang lebih baik. Penelitian yang dilakukan oleh Marlisa dkk. (2015) menambahkan mekanisme pengolahan biologis terlekat dengan menggunakan *bioball* sebagai media penyangga. Penambahan *bioball* pada tripikon-S dengan HRT 48 jam menghasilkan efisiensi penyisihan *Chemical Oxygen Demand* (COD) sebesar 66% untuk beban COD 1.500 mg/L dan 64% untuk beban COD 2.000 mg/L. Penambahan *venturi-shaped-chamber* menghasilkan penyisihan COD 67% untuk beban COD 1.500 mg/L dan 65% untuk beban COD 2.000 mg/L pada HRT 48 jam (Putri dkk., 2015). Penambahan media *sand filter* pada pipa terluar menghasilkan efisiensi penyisihan BOD5 tertinggi sebesar 57% (Maheng dkk., 2016). Bentuk modifikasi lain yang pernah dilakukan adalah penambahan filter ijuk setelah pipa terluar yang dilakukan oleh Kabupaten Hulu Sungai Utara, namun belum pernah diteliti dalam laboratorium sehingga tidak diketahui efisiensinya. Tripikon-S pada awalnya dirancang untuk pengolahan limbah tinja (*black water*), namun hingga saat ini

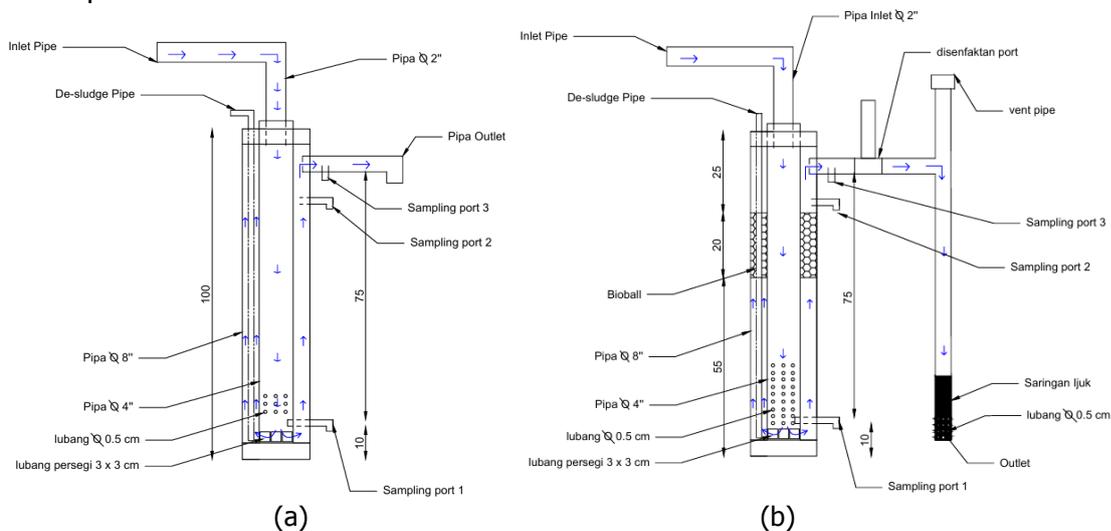
penelitian terkait tripikon-S juga dilakukan untuk melihat kemampuan tripikon-S dalam pengolahan limbah lain, seperti limbah industri tahu yang menghasilkan efisiensi penyisihan COD dalam waktu 30 hari sebesar 70,41%, penyisihan BOD sebesar 74,83% dan pH sebesar 31,25% (Sardi dkk., 2021).

Pada penelitian ini dilakukan modifikasi terhadap tripikon-S dengan penggabungan dari modifikasi-modifikasi pada penelitian sebelumnya, yakni dengan menambahkan mekanisme pengolahan bakteri terlekat menggunakan *bioball* dan menambahkan filtrasi fisik menggunakan filter ijuk di akhir pengolahan. Pemilihan *bioball* sebagai media pelekatan bakteri didasarkan pada karakteristik yang ringan dan mengapung, cocok digunakan pada kondisi aerob maupun anaerob, memiliki luas permukaan spesifik 200 hingga 240 m^2/m^3 serta terbuat dari bahan *polyethylene plastic* dengan fraksi *void* 85% membuat *bioball* tahan terhadap korosi dan tidak mudah mengalami *clogging* (Sharipuddin & Awang, 2021; Apema dkk., 2023). Sedangkan ijuk merupakan serabut hitam dan keras pelindung pangkal pelepah daun enau atau daun aren (Manda dkk., 2022) yang sering kali digunakan sebagai media filtrasi dalam pengolahan air limbah dan air bersih karena sifatnya yang lentur dan padat sehingga cocok untuk dijadikan filter kotoran besar pada air limbah (Sulianto dkk., 2019). Selain itu diujikan dua jenis limbah yakni limbah *black water* dan limbah campuran domestik (campuran antara *black water* dan *grey water*). Penelitian ini bertujuan untuk mencari kinetika perubahan substrat dan pertumbuhan bakteri pada modifikasi tripikon-S dengan penambahan bioball pada pipa terluar (pipa ketiga) dan filter ijuk pada pipa *outlet*, serta kemampuan Tripikon-S modifikasi dalam mengolah limbah *black water* dan limbah campuran rumah tangga.

2. METODE

2.1 Set-up Reaktor

Dalam penelitian skala laboratorium ini tripikon menggunakan pipa berdiameter 2 inci untuk *inlet*, pipa diameter 4 inci sebagai pipa tengah dan pipa diameter 8 inci untuk pipa besar. Kemudian digunakan dua macam reaktor yakni reaktor kontrol dan reaktor modifikasi. Reaktor kontrol merupakan reaktor tripikon-S tanpa modifikasi apapun dan reaktor modifikasi merupakan reaktor tripikon yang diberikan modifikasi berupa penambahan *bioball* pada pipa 8 inci dan penambahan filter ijuk di pipa outlet. Adapun gambaran dari kedua reaktor dapat dilihat pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Reaktor Tripikon-S kontrol (a) dan Modifikasi (b)

Gambar 1 menunjukkan perbedaan desain pada reaktor tripikon-S kontrol (a) dan reaktor tripikon-S modifikasi (b). Reaktor tripikon-S modifikasi memiliki ruang tambahan pada pipa terluar untuk meletakkan *bioball*. *Bioball* yang digunakan merupakan tipe *golf* dan memiliki diameter 3 cm dimasukkan ke dalam pipa terluar hingga memenuhi seluruh volume ruang, yakni sebanyak 133 buah *bioball*. Modifikasi kedua yang dilakukan adalah penambahan saringan ijuk di titik *outlet* tripikon-S. Saringan ijuk dibuat setinggi 20 cm.

2.2. Inokulum bakteri dan limbah artifisial

Bakteri yang digunakan pada penelitian ini diambil dari septic tank komunal KSM Asli Atas II BKM Sukabungah Sejahtera Kelurahan Sukabungah, Kecamatan Sukajadi, Kota Bandung, Jawa Barat. Sludge dimasukkan ke dalam reaktor sebanyak 6 liter dengan perbandingan 20:80 dari air limbah artifisial (Marlisa dkk., 2015).

Terdapat tiga jenis limbah artifisial yang digunakan pada penelitian ini. Limbah artifisial yang digunakan pada fase *batch* (*seeding* dan aklimatisasi) menggunakan limbah artifisial yang diatur memiliki rasio C:N:P 250:5:1 yang sesuai untuk pertumbuhan bakteri anaerob (Va dkk., 2018; Li dkk., 2020). Adapun Limbah artifisial dibuat menggunakan glukosa sebagai sumber karbon, NH_4Cl sebagai sumber nitrogen dan KH_2PO_4 sebagai sumber fosfat. Sementara itu, pada fase kontinyu diberikan air limbah artifisial yang parameternya disesuaikan dengan kondisi air limbah asli. Terdapat dua macam limbah yang digunakan yaitu limbah artifisial *black water* dan limbah artifisial domestik campuran dengan beban polutan per parameter mengikuti acuan dari penelitian Widyarani dkk. (2022). Limbah artifisial pada fase kontinyu dibuat menggunakan bahan yang sama dengan limbah artifisial pada fase *batch*, dan digunakan kaolin $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ untuk mewakili *suspended solids* (SS).

2.3 Fase *batch*

Fase *batch* merupakan fase *seeding* dan aklimatisasi. Untuk mencapai kondisi *batch* dimana ditandai dengan tidak adanya aliran masuk dan keluar pada saat berlangsungnya sistem, sistem *batch* pada penelitian ini dibuat dengan cara meresirkulasi air limbah artifisial secara terus menerus dengan menghubungkan *outlet* dan selang *inlet* di sebuah ember (kapasitas 50 liter). Efluen yang keluar dari pipa *outlet* akan tertampung dalam ember yang kemudian dipompa kembali ke *inlet* reaktor. Pompa yang digunakan adalah pompa *submersible* karena dapat memenuhi kebutuhan daya dorong hingga 1 meter, tidak membutuhkan daya Listrik yang besar, serta dapat digunakan 24 jam nonstop. Selang inlet memiliki diameter $\frac{3}{4}$ inci dan Panjang 150 cm. Aklimatisasi dilakukan secara bertahap dengan mengacu pada limbah *black water* di Indonesia memiliki rentang COD 509 – 2.361 mg/L (rata-rata 1.435 mg/L) dimana angka COD 2.361 mg/L diperoleh dari IPAL komunal (Widyarani dkk., 2022). Sehingga aklimatisasi dilakukan dengan variasi beban COD 500, 750 dan 1.000 mg/L dengan tiga kali pengulangan. Pengambilan sampel dilakukan setiap satu jam dan dihentikan setelah tercapai fase *stationer* atau *steady state* dimana penyisihan zat organik mencapai konsentrasi yang stabil atau konstan selama tiga kali pengambilan sampel berturut-turut (Putri dkk., 2021).

Pada tahap ini dilakukan analisis kinetika penurunan substansi yang direpresentasikan dengan beban COD, dan kinetika pertumbuhan bakteri yang dianalisis menggunakan parameter *volatile suspended solids* (VSS) menggunakan model kinetika Monod. Kinetika model Monod digunakan karena model matematis tanpa dimensi ini merupakan model yang tidak menggambarkan struktur agregat, namun telah banyak digunakan untuk menggambarkan pertumbuhan bakteri di pengolahan air limbah, seperti pada *activated sludge* dan *biofilm* (Plates dan Lahore, 2022). Sedangkan, kinetika penyisihan substrat dicari menggunakan kinetika orde satu dengan asumsi bahwa laju penyisihan substrat atau laju perubahan

konsentrasi COD sebanding dengan konsentrasi COD yang tersisa, dan berjalan linear dengan waktu. Kinetika orde satu dipilih untuk menggambarkan laju penyisihan COD karena sesuai dengan banyak proses biologis dimana laju degradasi berkurang seiring dengan penurunan konsentrasi COD. Selama fase *batch* dilakukan pengukuran suhu, pH dan *dissolved oxygen* (DO) untuk memantau kondisi lingkungan dalam reaktor (Aimia & JAR, 2023). Sampel COD diambil dari *sampling port 3* sedangkan sampel VSS diambil dari *sampling port 1* (Gambar 1). Pada fase *batch*, filter ijuk tidak digunakan agar tidak terjadi proses penyaringan yang dapat mempengaruhi hasil perhitungan VSS.

2.5 Fase kontinyu

Fase kontinyu dijalankan setelah fase *batch* ketika biomassa telah melekat pada media *bioball* dan telah siap mengolah limbah. Reaktor dijalankan dengan waktu tinggal dua hari (HRT 48 jam) (Putri dkk., 2015) untuk melihat kinerjanya dalam mengolah limbah *black water* dan limbah domestik campuran. Untuk memperoleh kondisi kontinyu, air limbah artifisial dimasukkan ke dalam ember penampung influen, air limbah kemudian dipompa menggunakan pompa peristaltik ke dalam reaktor. Pompa peristaltik diatur untuk mengalirkan air ke dalam reaktor dengan kecepatan 11 rpm. Perhitungan kecepatan (satuan rpm) diperoleh dengan melakukan *trial and error*. Parameter yang dianalisis pada fase ini adalah COD, *total suspended solids* (TSS) dan amoniak. Sampel diambil pada awal running dan akhir running dengan pengambilan sampel COD dan TSS dilakukan pada titik *inlet*, *sampling port 3* dan titik *outlet* reaktor (Gambar 1). Sementara itu untuk parameter amoniak, sampel hanya diambil di *inlet* dan titik *outlet* reaktor dan tidak dilakukan pengambilan di titik *sampling port 3* karena terdapat kesulitan pengambilan sampel karena aliran air yang sangat kecil.

2.5 Analisis data

Parameter yang diuji pada fase *batch* adalah COD sebagai parameter yang menggambarkan penurunan substrat, VSS sebagai parameter yang menggambarkan pertumbuhan bakteri, serta pH, suhu dan DO untuk meninjau kondisi lingkungan bakteri. Sedangkan pada fase kontinyu parameter yang diuji adalah COD, Amoniak, pH dan TSS. Metode yang digunakan pada masing-masing parameter dijabarkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Metode Uji Parameter

No	Parameter	Metode
1	COD	SNI 6989.2:2019
3	Amoniak	SMWW 4500-NH ₃
4	pH	SNI 6989.11:2019
5	Suhu	SNI 06-6989.23-2005
6	TSS	SNI 6989.3:2019
7	VSS	SMWW 2540E

Kinetika penyisihan COD dianalisis menggunakan kinetika orde satu, dan kinetika pertumbuhan bakteri dianalisis menggunakan kinetika Monod, μ_{max} dan K_s diperoleh dengan menggunakan kurva lineweaver-burk. Kinetika orde satu dijabarkan pada persamaan 1 dan 2. Sedangkan persamaan Monod dijabarkan pada persamaan 3.

$$St = dS/dt = -k[S] \quad (1)$$

$$St = S_0 \exp(-kt) \quad (2)$$

Dimana:

St = laju perubahan konsentrasi substrat (COD) terhadap waktu

S_0 = konsentrasi awal substrat (mg/L)
 $[S]$ = konsentrasi substrat (mg/L)
 k = konstanta laju orde satu
 t = waktu (hari)

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} \quad (3)$$

Dan Nilai Yield biomassa per substrat yang dapat diperoleh dari persamaan 4.

$$Y_{B/S} = \frac{\Delta CB}{\Delta S} \quad (4)$$

Dimana:

μ_{\max} = laju perubahan pertumbuhan maksimum bakteri (/waktu)
 μ = laju pertumbuhan bakteri (/waktu)
 S = konsentrasi substrat (mg/L)
 K_s = konstanta setengah jenuh
 CB = konsentrasi biomassa

Analisis kinerja reaktor terhadap pengolahan limbah *black water* dan limbah domestik campuran dilakukan dengan menganalisis efisiensi penyisihan parameter COD, Amoniak dan TSS dengan perhitungan disajikan pada persamaan 5.

$$\text{Efisiensi penyisihan} = \frac{C - C_0}{C_0} \times \frac{100}{1} \quad (5)$$

Dimana C merupakan konsentrasi akhir (efluen) dan C_0 merupakan konsentrasi awal (influen).

Analisis statistik dilakukan dengan uji t (*t-test*) untuk melihat perbedaan signifikan antara hasil yang didapat dari reaktor modifikasi dan reaktor kontrol. Uji t yang dilakukan pada penelitian ini merupakan uji t berpasangan dua sisi (*paired 2-tails*) yang merupakan uji statistik untuk membandingkan rata-rata dua set data yang berpasangan. Uji ini dapat memberikan informasi apakah terdapat perbedaan yang signifikan baik lebih besar maupun lebih kecil tanpa memihak arah tertentu. Pada penelitian ini dilakukan uji t dengan tingkat signifikansi 0,05 menggunakan *software* Microsoft Excel.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik air limbah artifisial

Pada percobaan di fase *batch*, influen diatur agar memiliki rasio C:N:P sebesar 250:5:1 untuk mendukung pertumbuhan mikroba pada kondisi anaerob. Kemudian, pada fase kontinyu air limbah disesuaikan dengan kondisi air limbah di Indonesia sebagaimana dimuat dalam Tabel 2 dan 3.

Tabel 2. Karakteristik Limbah Artifisial *Black Water*

Parameter	Satuan	Limbah Aritifisial	Limbah black water ⁽¹⁾
COD	mg/L	741,488	509-2361 (1435±1310)
Amoniak	mg/L	110	112
TSS	mg/L	298	184-482 (333±211)
pH	-	5,86	6,2-7,4 (7,1±0,3)

⁽¹⁾Widyarani dkk. (2022)

Tabel 2 dan 3 menunjukkan perbandingan karakteristik limbah artifisial yang digunakan dengan limbah dari penelitian acuan, diperoleh hasil konsentrasi COD, amoniak dan TSS limbah artifisial sesuai dengan konsentrasi limbah rujukan. Namun untuk parameter pH, limbah artifisial lebih asam dibandingkan dengan referensi yang digunakan, hal ini dapat disebabkan oleh pH dalam air amidis kemasan berkisar antara 5-6.

Tabel 3. Karakteristik Limbah Artifisial Domestik Tercampur

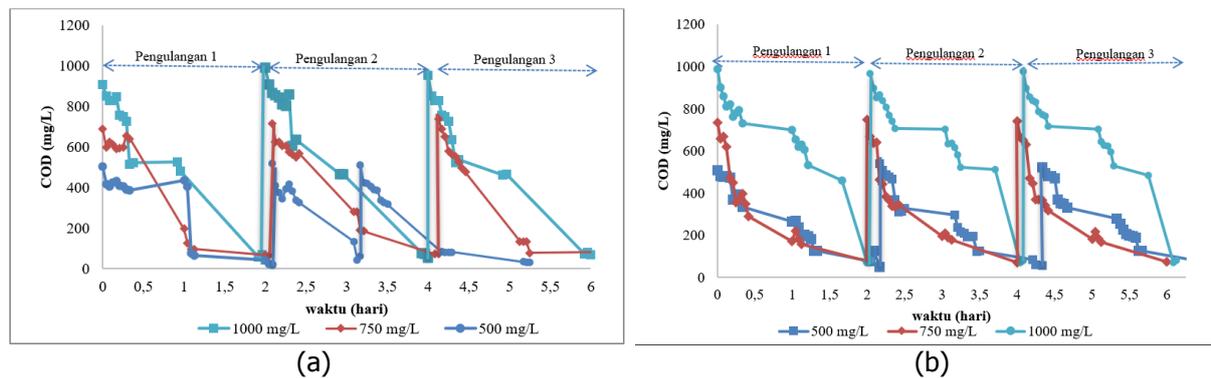
Parameter	Satuan	Limbah Aritifisial	Limbah domestik tercampur ⁽¹⁾
COD	mg/L	338,050	148-472 (311±144)
Amoniak	mg/L	76,5	0,1-259 (45±87)
TSS	mg/L	175,164	25-1148 (462±357)
pH	-	5,62	6,7-7,5 (6,8±0,8)

⁽¹⁾Widyarani dkk. (2022)

3.2 Kinetika penyisihan substrat dan pertumbuhan bakteri

Pengujian pada fase *batch* menunjukkan suhu reaktor modifikasi berkisar antara 27,17-28,60°C, sedangkan reaktor kontrol tidak jauh berbeda dengan kisaran suhu 25,30-28,10°C. Rentang suhu pada kedua reaktor tersebut menunjukkan bahwa mikroorganisme yang bekerja merupakan mikroorganisme mesofilik, yaitu mikroorganisme yang hidup pada suhu 20-40°C (Suresh dkk., 2021). Pengukuran pH menunjukkan bahwa kisaran pH reaktor modifikasi berkisar antara 6,16-6,87, sedangkan pada reaktor kontrol kisaran pH lebih bervariasi yaitu berkisar antara 5,51-6,99. Hal ini menunjukkan bahwa kedua reaktor memiliki kisaran pH yang sesuai untuk mendukung pertumbuhan bakteri (Suresh dkk., 2021). Sedangkan untuk parameter DO, reaktor modifikasi berada pada rentang 1,8 hingga 4,9 mg/L. Sementara untuk reaktor kontrol DO berada pada rentang 1,4 hingga 2,9. Data *dissolved oxygen* kedua reaktor mengindikasikan bahwa reaktor berada dalam kondisi anoksik hingga aerob. Kondisi tingginya DO dapat terjadi karena sirkulasi air menyebabkan turbulensi, influen yang masuk didorong oleh pompa berkecepatan tinggi (kecepatan influen terhitung 9 L/menit) dan menyebabkan terjunan air yang menimbulkan turbulensi. Turbulensi yang ada mengakibatkan aliran semakin acak dan menyebabkan kenaikan pada nilai DO dalam air (Afisna dan Juwana, 2020).

Pengujian COD dilakukan untuk menghitung kinetika perubahan substrat pada reaktor. Hasil pengujian COD ditunjukkan pada Gambar 2, untuk beban COD 500, 750 dan 1.000 mg/L, baik untuk reaktor modifikasi maupun reaktor kontrol pada hari pertama terjadi penurunan yang signifikan pada COD, terutama pada konsentrasi 1.000 mg/L yang mengalami penurunan yang lebih drastis dibandingkan konsentrasi 500 dan 750 mg/L. Pada siklus pertama dapat dilihat bahwa untuk masing-masing beban konsentrasi substrat mulai stabil setelah memasuki hari kedua. Pada akhir siklus pertama, semua konsentrasi COD mendekati 0, tetapi untuk konsentrasi 1.000 mg/L tetap menunjukkan nilai COD yang lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi 500 dan 750 mg/L. Kemudian pada siklus kedua, penurunan COD menunjukkan pola yang sama dengan siklus pertama. Penurunan pada beban COD 500 mg/L di akhir waktu tinggal siklus kedua menunjukkan penurunan yang lebih cepat dibandingkan dengan beban COD 750 dan 1.000 mg/L. Kemudian pada siklus ketiga, masing-masing variasi beban menunjukkan penurunan COD yang lebih cepat dan tidak berfluktuatif seperti pada penurunan pertama dan kedua menandakan pengolahan pada siklus ketiga telah efektif. Hal ini dapat disebabkan oleh mikroba telah beradaptasi dengan jenis limbah sehingga mencapai kondisi efektif.



Gambar 2. Grafik Perubahan Konsentrasi COD pada Reaktor Modifikasi (a) dan Kontrol (b)

Kinetika penyisihan substrat pada kedua reaktor dihitung dengan model kinetika orde satu yang menghasilkan nilai konstanta laju penyisihan COD (k) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4. Hasil perhitungan nilai k pada reaktor modifikasi diperoleh laju degradasi substrat pada COD 500 dan 750 mg/L memiliki nilai yang berdekatan (0,053/jam dan 0,0537/jam) mengindikasikan bahwa pada konsentrasi COD rendah hingga menengah laju penyisihan COD relatif konstan. Sementara itu pada beban COD 1.000 mg/L terjadi penurunan nilai laju penyisihan menjadi 0,0442/jam yang dapat disebabkan oleh efek inhibisi pada bakteri yang bekerja mengakibatkan berkurangnya efisiensi penyisihan yang dilakukan oleh bakteri. Hal tersebut juga terjadi pada reaktor kontrol, dimana pada konsentrasi substrat 750 mg/L diperoleh nilai k yang paling baik.

Tabel 4. Nilai k (Laju Penyisihan COD) pada Reaktor Tripikon-S Modifikasi dan Kontrol

Konsentrasi Substrat	reaktor modifikasi		reaktor kontrol	
	k (/jam)	R^2	k (/jam)	R^2
500 mg/L	0,0530	0,9207	0,0633	0,900
750 mg/L	0,0537	0,972	0,1000	0,933
1000 mg/L	0,0442	0,9351	0,0333	0,945

Hasil perhitungan nilai konstanta laju penyisihan COD (k) pada tabel 4 menunjukkan bahwa reaktor kontrol memiliki laju penyisihan yang lebih cepat daripada reaktor modifikasi pada konsentrasi substrat 500 dan 750 mg/L, namun pada konsentrasi 1.000 mg/L reaktor modifikasi mengungguli laju penyisihan substrat pada reaktor kontrol.

Sementara itu, *Yield* biomassa terhadap substrat pada reaktor modifikasi juga dihitung, nilai *yield* menunjukkan seberapa banyak biomassa yang diproduksi per unit substrat yang dikonsumsi. Hasil perhitungan parameter kinetika pertumbuhan bakteri pada reaktor modifikasi ditunjukkan pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Kinetika Pertumbuhan Bakteri

Influen COD (mg/L)	k (/jam)	$Y_{b/s}$	K_s (mg/L COD/jam)	μ_{max} (/jam)
500	0,053	2,57088	942,277	0,0524
750	0,0537			
1000	0,0442			

Tabel 5 merupakan rekapitulasi perhitungan kinetika degradasi substrat dan pertumbuhan bakteri, sedangkan konstanta kinetika dari penelitian-penelitian sebelumnya dirangkum pada

Tabel 6. Nilai μ_{max} yang diperoleh pada penelitian ini lebih tinggi bila dibandingkan dengan nilai μ_{max} tripikon-S *bioball* (Marlisa dkk., 2015) yakni 0,00032/hari. Hal ini dapat terjadi disebabkan oleh perbedaan beban COD yang lebih rendah pada penelitian ini sehingga menyebabkan μ_{max} yang didapat lebih tinggi. Hal ini juga dapat terjadi karena bakteri yang digunakan pada penelitian Marlisa dkk. (2015) berasal dari rumen sapi yang bisa jadi memiliki komunitas bakteri yang berbeda dengan bakteri yang digunakan pada penelitian ini. Sementara itu, *yield* yang diperoleh pada penelitian ini sebesar 2,57088 mg VSS/mg COD, menunjukkan angka yang lebih besar dibandingkan dengan penelitian oleh Marlisa (2015) menunjukkan bahwa reaktor modifikasi lebih baik dalam mengolah substrat sehingga menghasilkan lebih banyak biomassa.

Tabel 6. Ringkasan Konstanta Kinetika yang Diperoleh dari Penelitian yang Relevan

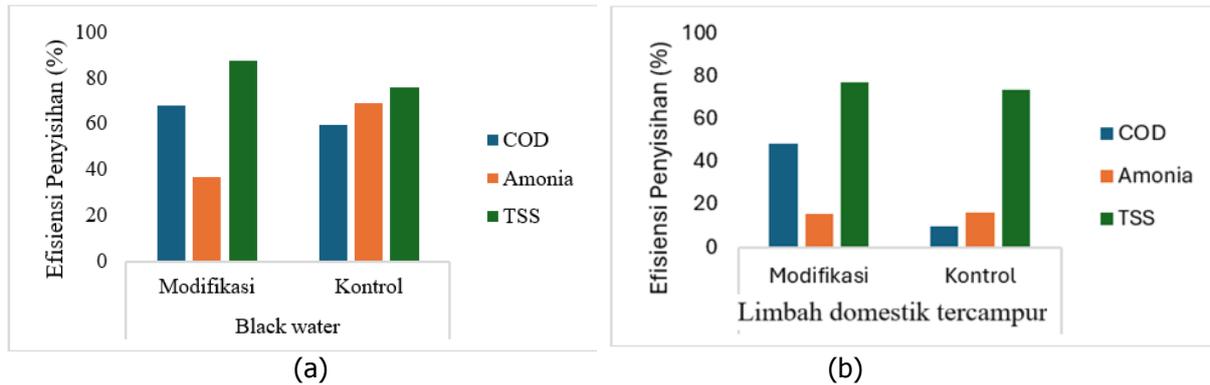
Penulis	Influen (mg/L)	K (mg/L COD/hari)	Ks (mg/L COD)	μ_{max} (/hari)	Y (mg VSS/ mg COD)	Jenis Bakteri	Jenis Reaktor
Marlisa, D (2015)	1500	0,0242	107,79	0,00032	0,6183	Mixed culture	Tripikon-S bioball
	2000	0,033	37,292	0,00082	1,4		
Faekaha dkk (2020)	1300 - 5200	0,371	84,1	0,011	29,7	Mixed culture	UAF
Faekaha dkk (2017)	300-700	1,13	31,34		156	Mixed culture	AnFFBR

Sementara nilai laju degradasi COD lebih (k) lebih rendah daripada Ks, hal ini juga terjadi pada penelitian oleh Marlisa (2015) dan Faekaha (2017). Dijelaskan bahwa nilai Ks yang besar akan menghasilkan biodegradabilitas substrat yang lebih tinggi. Kondisi nilai Ks lebih besar daripada k dijelaskan sebagai kondisi yang baik dimana efisiensi proses tidak akan mengalami penurunan apabila terjadi kenaikan beban OLR (Faekaha dkk., 2020).

3.3 Kinerja reaktor terhadap penyisihan limbah

Pengujian kinerja reaktor terhadap penyisihan limbah dilakukan pada fase kontinu, uji DO pada reaktor menunjukkan reaktor dalam kondisi anoksik dimana kedua reaktor memiliki nilai DO 0,9 ppm. Pengujian menggunakan limbah artifisial *black water* dan limbah artifisial domestik tercampur menghasilkan efisiensi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Hasil efisiensi penyisihan COD limbah *black water* pada reaktor modifikasi menunjukkan hasil yang lebih baik daripada reaktor kontrol dimana reaktor modifikasi memiliki efisiensi penyisihan 67,76% sedangkan reaktor kontrol menunjukkan hasil efisiensi 59,4%. Sedangkan pada parameter TSS diperoleh efisiensi penyisihan sebesar 87,5% untuk reaktor modifikasi dan 75,56% untuk reaktor kontrol. Uji t-test menghasilkan P-value sebesar 0,818 (lebih besar daripada α 0,05) yang mengindikasikan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan, modifikasi pada tripikon-S tidak memberikan peningkatan kinerja yang signifikan terhadap pengolahan limbah *black water*.

Meskipun demikian, hasil pengujian COD dan TSS yang diambil pada titik sampel sebelum dan setelah melewati filter ijuk yang dimuat pada Tabel 7 menunjukkan bahwa penggunaan filter ijuk di akhir *outlet* memberikan peningkatan penyisihan COD dan TSS sebesar 28,41% dan 8,89%. Hal ini menunjukkan bahwa modifikasi penambahan filter ijuk dan bioball pada tripikon-S dan menaikkan kinerja reaktor tripikon-S dalam pengolahan limbah *black water*.



Gambar 3. Efisiensi Penyisihan Reaktor terhadap Limbah Artifisial *Black Water* (a) dan Limbah Artifisial Domestik Tercampur (b)

Rendahnya efisiensi penyisihan amoniak dapat terjadi mengingat reaktor berada pada kondisi anoksik. Pada proses pengolahan dalam kondisi anoksik, tidak terdapat oksigen bebas sehingga nitrat (NO_3^-) digunakan sebagai akseptor elektron sehingga terjadi proses denitrifikasi. Proses ini berfokus pada pengurangan nitrat sehingga terbentuk gas N_2 . Proses ini tidak melibatkan amoniak sehingga amoniak tidak dikonversi. Tingginya amoniak yang tidak terkonversi menjadi penyebab tingginya konsentrasi total nitrogen pada air limbah. Meskipun proses denitrifikasi tidak melibatkan amoniak, konsentrasi amoniak tetap dapat berkurang dapat disebabkan oleh asimilasi bakteri dimana terdapat beberapa bakteri yang menggunakan amoniak sebagai sumber nitrogen untuk sintesis protein. Proses asimilasi lebih berfokus pada pemanfaatan amoniak untuk pertumbuhan mikroba sehingga penyisihan amoniak tidak terjadi sebesar pada proses nitrifikasi. Adapun kondisi penyisihan amoniak pada reaktor kontrol lebih besar daripada reaktor modifikasi bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh Wu (2016) yang menunjukkan bahwa dalam proses annamox, reaktor dengan bakteri tersuspensi memberikan efisiensi penyisihan nitrogen lebih besar daripada reaktor dengan bakteri terlekat karena terjadi proses *mixing* yang lebih baik yang mengakibatkan transfer massa yang lebih baik. Sementara pada reaktor dengan bakteri terlekat terjadi keterbatasan difusi pada biofilm yang mengakibatkan laju penyisihan nitrogen menjadi lebih rendah.

Penyisihan limbah artifisial domestik tercampur yang ditunjukkan pada Gambar 3, apabila dibandingkan dengan reaktor kontrol, reaktor modifikasi memiliki efisiensi penyisihan yang lebih baik pada parameter COD dimana reaktor modifikasi memiliki efisiensi penyisihan 48,64% sedangkan reaktor kontrol memiliki efisiensi penyisihan sebesar 9,85%. Sedangkan dalam parameter amoniak, reaktor kontrol lebih unggul dibandingkan dengan reaktor modifikasi namun hasilnya tidak berbeda jauh, dimana efisiensi penyisihan reaktor modifikasi sebesar 15,56% sedangkan reaktor kontrol sebesar 16,28%. Kemudian dalam parameter TSS, kedua reaktor memiliki efisiensi penyisihan yang berdekatan, dimana reaktor modifikasi memiliki efisiensi penyisihan sebesar 76,98% dan reaktor kontrol memiliki efisiensi penyisihan sebesar 73,67%.

Hasil uji statistika t-test menunjukkan nilai P-value sebesar 0,03569 (lebih kecil daripada α 0,05) yang mengindikasikan bahwa terdapat perbedaan signifikan antara efisiensi tripikon-S modifikasi terhadap pengolahan limbah *black water* dan limbah domestik tercampur, sehingga hipotesis diterima, terdapat perbedaan efisiensi pada aplikasi modifikasi Tripikon-S untuk pengolahan limbah *black water* dan limbah domestik tercampur. Tripikon-S lebih baik digunakan untuk pengolahan limbah *black water*.

Tabel 7. Perbandingan Efisiensi Penyisihan COD Dan TSS Sebelum Dan Setelah Melewati Filter Ijuk

Reaktor	Penyisihan COD (%)		Penyisihan TSS (%)	
	titik sampel 3	Outlet	titik sampel 3	Outlet
Modifikasi	39,35%	67,76%	78,62%	87,51%
Kontrol	63,22%	52,82%	Tidak terbaca	78,28%

Tabel 7 menunjukkan hasil penggunaan filter ijuk, dimana filter ijuk yang ditambahkan pada reaktor modifikasi memberikan peningkatan penyisihan pada parameter COD dan TSS. Sedangkan pada reaktor kontrol yang tidak diberi filter ijuk, penyisihan COD mengalami penurunan efisiensi, hal ini dapat disebabkan oleh biomassa yang mengalami peluruhan ikut terbawa aliran air sehingga meningkatkan nilai COD. Keberadaan filter ijuk mampu menyaring luruhan biomassa sehingga pada reaktor modifikasi terjadi peningkatan efisiensi sedangkan pada reaktor kontrol tidak terjadi peningkatan efisiensi.

4. KESIMPULAN

Diperoleh nilai μ_{max} sebesar 0,0524/jam dan K_s 942,277 mg/L COD/jam, serta nilai yield 2,5709. Laju degradasi substrat (k) pada konsentrasi 500, 750 dan 1.000 mg/L diperoleh berturut-turut sebesar 0,053/jam, 0,0537/jam dan 0,0442/jam pada reaktor modifikasi. Penyisihan limbah artifisial *black water* menunjukkan hasil yang lebih baik pada reaktor modifikasi dengan efisiensi penyisihan COD 67,76% sedangkan reaktor kontrol menunjukkan hasil efisiensi 59,4%. Sedangkan pada parameter TSS diperoleh efisiensi penyisihan sebesar 87,5% untuk reaktor modifikasi dan 75,56% untuk reaktor kontrol. Namun untuk parameter amoniak, reaktor kontrol memiliki penyisihan yang lebih tinggi dibandingkan dengan reaktor modifikasi. Hasil uji t mengindikasikan reaktor modifikasi tidak memberikan perbedaan kinerja yang signifikan terhadap pengolahan limbah *black water* dibandingkan dengan reaktor kontrol. Penambahan filter ijuk pada akhir reaktor dapat meningkatkan efisiensi penyisihan COD sebesar 28,41% dan TSS sebesar 54,94%. Hasil uji t menunjukkan tripikon-S dapat menyisihkan limbah *black water* lebih baik dibandingkan limbah domestik tercampur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim penelitian RISE dan Teknik Lingkungan ITB untuk segala bantuan dan fasilitas yang diberikan pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Afisna, L. P., & Juwana, W. E. (2020). Aplikasi Microbubble Generator Porousventuri pada Pengolahan Air Limbah Buatan. *Kurvatek*, 5(1), 11-18.
- Aimia, T. A., & JAR, N. R. (2023). Penyisihan COD, TSS, dan TN pada Lindi TPA Klotok Menggunakan Anoxic-Oxic Moving Bed Biofilm Reactor. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, 2(4), 771-779.
- Apema, F. D., Rahayu, D. E., Adnan, F., & Waryati. (2023). Penggunaan Media Sarang Tawon dan Bioball pada Biofilter Aerob pada Pengolahan Limbah Cair Laundry. *Jurnal Teknologi Lingkungan UNMUL*, 7(1), 81-89.
- Faekaha, I. N., Fatihaha, S., & Mohamed, Z. S. (2020). Kinetic Evaluation of A Partially Packed Upflow Anaerobic Fixed Film Reactor Treating Low-Strength Synthetic Rubber Wastewater. *Heliyon*, 6(3), e03594.

- Li, S., He, K., Gao, N., & Nan, J. (2022). Characteristic Analysis on Temporal Evolution of Granulation in A Modified Anaerobic Digestion System. *Applied Science* 2022, 12(33), 12127.
- Maheng, M. D., Zevenbergen, C., Putra, A., & Ndibale, W. (2015). A Household Sanitation Technology for Amphibious Housing. *International Conference on Amphibious Architecture, Design and Engineering (ICAADE 2015)*.
- Manda, M., Hadi, S., Fatma, M., Iradat, A. A., Sari, R. S., Hariyani, N., Annisa, A. B., Azira, R., Rasidy, E. J., Manalu, W. A., & Ravi, M. (2022). Pengolahan Filter Air Gambut Sederhana Menjadi Program Unggulan Kukerta di Desa Pakning Asal. *Mandaniya*, 3(4), 685-690.
- Marlisa, D. F., Putri, D. W., & Soewondo, P. (2015). Modification of Tripikon-S with Bioball Addition in Artificial Black Water Treatment for Swamp and Coastal Areas. *The Third Joint Seminar of Japan and Indonesia Environmental Sustainability and Disaster Prevention (3rd EDSP-2015)*.
- Noor, R. T., & Soewondo, P. (2018). Selection of Domestic Wastewater Treatment Technology Alternative Using Life Cycle Assesment (LCA) Approach (Case Study: Settlement Area of Riverbank Karang Mumus of Samarinda City, East Kalimantan). *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 1(2), 164-184.
- Plates, M., & Lahore, H. M. (2022). Perspective on the Monod Model in Biological Wastewater Treatment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*.
- Putri, D. W, Marlisa, D. F., Kusumaningayu, D. A., Soewondo, P., Effendi, A., & Setiadi, T. (2015). Organic Substance Removal Using Modified Tripikon S - System. *The 5th Environmental Technology and Management Conference*.
- Putri, K. F. C., Farahdiba, A. U., & Ali, M. (2021). Pengolahan Air Limbah Laundry Menggunakan Proses Bioreaktor Down-Flow Hanging Sponge. *ESEC Teknik Lingkungan*, 2(1), 110-116.
- Rachman, D. N. (2016). Penggunaan Tripikon-S sebagai Alternatif Penggunaan Septic Tank di Daerah Tepian Sungai dan Rawa. *Jurnal Tekno Global*, 5(1), 40-49.
- Sardi, Sriyono, E., Bhakty, T.E., Hayininda, G.A. (2021). The Effectiveness of the Use of Tripikon-S in Tofu Industry Wastewater Treatment. In: Mohammed, B.S., Shafiq, N., Rahman M. Kutty, S., Mohamad, H., Balogun, AL. (eds) *ICCOEE2020. ICCOEE 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 132. Springer, Singapore.
- Sembiring, E. T. J., & Safithri, A. (2021). Permasalahan Sanitasi di Permukiman Pesisir Jakarta serta Rekomendasi Teknologi Pengelolaannya. *Environmental Occupational Health and Safety Journal*, 2(1), 19-34.
- Sharipuddin, N. S. S., & Awang, Z. (2021). Biofilm System Design and Comparative Study of Biomedia using in Domestic Wastewater Treatment. *Progress in Engineering Application and Technology*, 2(2), 001-010.
- Sulianto, A. A., Kurniawati, E., & Hapsari, A.A. (2019). Perancangan Unit Filtrasi untuk Pengolahan Limbah Domestik Menggunakan Sistem Downfall. *Jurnal Sumber Daya Alam dan Lingkungan*, 6(3), 31-39.
- Suresh, A., Rampogal, D. S., Gopinath, K. P., Arun, J., SundarRajan, P., & Bhatnagar, A. (2021). Recent Advancements in the Synthesis of Novel Thermostable Biocatalysts and Their Applications in Commercially Important Chemoenzymatic Conversion Process. *Bioresource Technology* 323.
- Va, V., Setiyawan, A. S., Soewondo, P., & Putri, D. W. (2018). The Characteristics of Domestic Wastewater from Office Buildings in Bandung, West Java, Indonesia. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 1(2), 199-214.
- Waskito, A., Bizri, M. A., Ikhwan, H., Rusmaliah, & Anggeriana, Y. (2022). Policy Brief: Pemanfaatan WC Tripicon untuk Sanitasi di Bantaran Sungai no. 15 Agustus 2022. Kab. Hulu Sungai Selatan: Bapellitbangda Kabupaten Hulu Sungai Selatan.

- Widyarani, Wulan, D. R., Hamidah, U., Komarulzaman, A., Rosmalina, R. T., & Sintawardani, N. (2022). Domestic wastewater in Indonesia: generation, characteristics and treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 32397-32414.
- Wu, S. (2016). Suspended Growth and Attached Growth Anammox for Nitrogen Removal from Different Waste Streams-Process Stratup and Performance. [Doctoral Dissertation, The University of Utah]. <https://core.ac.uk/download/pdf/276263947.pdf>