

Optimasi Belt Press dan Diffuser untuk Efisiensi IPLT Depok

Rinette Visca¹, Apriyan Nurmaulana², Rendhy Prasetya Utama³

Universitas Jayabaya, Indonesia

E-mail: viscairsyad96@gmail.com

Kata Kunci	Abstrak
Belt press, Diffuser Aerator, Lumpur tinja, Pupuk organik, Pengolahan limbah	Instalasi Penanganan Limbah Terpadu (IPLT) Kota Depok menghadapi tantangan dalam optimasi produksi pupuk organik dari lumpur tinja dan efisiensi pengolahan limbah output. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan parameter operasional sistem belt press untuk produksi pupuk dan mengevaluasi implementasi diffuser aerator dalam mempercepat pengolahan limbah akhir melalui integrasi sistem pemisahan padat-cair (belt press) dengan pengolahan biologis aerobik (diffuser). Metode eksperimental dilakukan dengan variasi kecepatan blower pump (1045, 2038, dan 3012 rpm) untuk menganalisis pengaruhnya terhadap debit lumpur dan produksi pupuk. Simulasi pemasangan diffuser dilakukan berdasarkan perhitungan kebutuhan oksigen dan kapasitas kolam biofilter. Hasil penelitian menunjukkan hubungan eksponensial antara kecepatan blower dan debit lumpur ($R^2=0,9979$) serta antara debit lumpur dan berat pupuk ($R^2=0,9778$). Kecepatan optimal diperoleh pada 2038 rpm dengan produksi 97,5 kg/jam atau 27 karung/hari, meningkat 50% dari kondisi awal. Kecepatan 3012 rpm secara teoritis dapat menghasilkan 175,5 kg/jam, namun terkendala kapasitas bak mixer yang menyebabkan penyumbatan. Simulasi menunjukkan instalasi 12-14 unit Dracon Soc Diffuser dengan debit input 0,21 m ³ /menit dapat mereduksi waktu retensi limbah dari 7 hari menjadi 1 hari dengan efisiensi difusi oksigen 8%. Volume total suplai udara mencapai 2657,29 m ³ /hari untuk kolam biofilter 112.500 m ³ . Penelitian ini memberikan rekomendasi teknis untuk peningkatan kapasitas produksi pupuk organik dan akselerasi pengolahan limbah melalui optimasi parameter operasional dan penambahan sistem aerasi mekanik.
Keywords	Abstract
Belt press, Diffuser Aerator, Sludge, Organic fertilizer, Waste treatment	<i>The Integrated Waste Treatment Installation (IPLT) of Depok City faces challenges in optimizing organic fertilizer production from fecal sludge and enhancing the efficiency of waste processing outputs. This study aims to optimize the operational parameters of the belt press system for fertilizer production and evaluate the implementation of aerator diffusers to accelerate the treatment of final waste. Experimental methods were conducted with variations in blower pump speeds (1045, 2038, and 3012 rpm) to analyze their effects on sludge flow rate and fertilizer production. The installation of diffusers was simulated based on calculations of oxygen demand and the capacity of the biofilter pond. The results indicate an exponential relationship between blower speed and sludge flow rate ($R^2=0.9979$) as well as between sludge flow rate and fertilizer weight ($R^2=0.9778$). The optimal speed was found to be at 2038 rpm, yielding a production of 97.5 kg/hour or 27 bags/day, which represents a 50% increase from the initial condition. Although a speed of 3012 rpm theoretically could produce 175.5 kg/hour, it was hindered by the capacity of the mixer tank, leading to blockages. Simulations revealed that installing 12-14 units of the Dracon Soc Diffuser with an input flow rate of 0.21 m³/min could reduce the waste retention time from 7 days to 1 day, achieving an oxygen diffusion efficiency of 8%. The total air supply volume reached 2657.29 m³/day for a biofilter pond of 112,500 m³. This research provides technical recommendations for enhancing organic fertilizer production capacity and accelerating waste treatment through the</i>



PENDAHULUAN

Pengelolaan lumpur tinja merupakan aspek krusial dalam sanitasi perkotaan yang berdampak langsung terhadap kesehatan masyarakat dan kualitas lingkungan. Di Indonesia, 85% peningkatan sanitasi difokuskan pada sistem sanitasi individual (on-site sanitation), dimana pengelolaan lumpur tinja menjadi komponen vital dalam mencapai target nasional (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2014). Instalasi Penanganan Limbah Terpadu (IPLT) sebagai fasilitas pengolahan lumpur tinja terpusat menghadapi tantangan ganda: meningkatkan efisiensi produksi pupuk organik sebagai produk bernilai ekonomi sambil memastikan kualitas efluen memenuhi baku mutu lingkungan yang semakin ketat (Ahmad, 2021).

IPLT Kota Depok, yang dibangun tahun 1996 dengan kapasitas desain 70 m³/hari, melayani pengolahan lumpur tinja dari tangki septik rumah tangga dan IPAL komersial di Kota Depok dan sebagian Kabupaten Bogor dengan luas lahan 2,2 hektar. Seiring pertumbuhan penduduk Kota Depok yang mencapai 2,5 juta jiwa pada tahun 2021, beban pengolahan lumpur tinja meningkat signifikan hingga mendekati kapasitas maksimum instalasi. Kondisi ini menuntut optimasi sistem operasional untuk meningkatkan throughput tanpa ekspansi fisik yang memerlukan investasi besar dan lahan tambahan yang terbatas.

Teknologi belt press telah luas digunakan dalam dewatering lumpur karena kemampuannya memproses volume besar secara kontinu dengan footprint relatif kecil (Zhang et al., 2017). Prinsip kerja belt press mengandalkan kombinasi gravitasi, tekanan mekanik, dan shear force untuk memisahkan fase padat dan cair lumpur melalui conveyor belt berpori yang bergerak. Namun, efisiensi operasional belt press sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter operasional seperti kecepatan conveyor, tekanan press, laju umpan lumpur, penambahan polimer koagulan, dan karakteristik lumpur input (Mahmoud et al., 2016). Penelitian Nurdiana dan (Warmadewanthi, 2015) di IPLT Keputih Surabaya menunjukkan bahwa optimasi parameter belt press dapat meningkatkan kandungan padatan lumpur dari 18% menjadi 25%, mengurangi volume lumpur hingga 40% dan meningkatkan produksi pupuk organik secara proporsional.

Sementara itu, (Liu et al., 2020) melaporkan bahwa variasi kecepatan umpan lumpur secara signifikan mempengaruhi efisiensi dewatering dengan pola korelasi non-linear, dimana peningkatan laju umpan hingga titik tertentu meningkatkan throughput namun setelah melampaui titik kritis justru menurunkan efisiensi karena waktu kontak belt-lumpur yang terlalu singkat. Fenomena ini mengindikasikan pentingnya identifikasi kondisi operasional optimal yang mempertimbangkan keseimbangan antara produktivitas dan kualitas output. Penelitian (Zhang et al., 2016) lebih lanjut menunjukkan bahwa pre-treatment kimia menggunakan peroxyacetic acid sebelum belt press dapat meningkatkan dewatering efficiency hingga 35%, namun dengan pertimbangan biaya operasional yang lebih tinggi.

Selain optimasi produksi pupuk, pengolahan limbah cair output belt press juga menjadi isu kritis di IPLT. Limbah cair hasil dewatering mengandung konsentrasi organik tinggi dengan BOD 6.480 mg/L dan COD 31.900 mg/L (U.S. EPA, 1994), memerlukan pengolahan biologis intensif sebelum dapat dibuang ke badan air penerima. Sistem pengolahan konvensional di IPLT umumnya menggunakan kolam stabilisasi dengan waktu

retensi 7-14 hari untuk mencapai removal organik yang memadai (Rahayu & Pribadi, 2020). Waktu retensi panjang ini mengakibatkan kebutuhan lahan luas dan risiko overflow saat musim hujan ketika influen meningkat drastis.

Sistem aerasi mekanik menggunakan diffuser telah terbukti efektif meningkatkan transfer oksigen dalam pengolahan biologis limbah, mempercepat aktivitas mikroorganisme aerobik dalam degradasi senyawa organik (Chen et al., 2019). Penelitian Kumar dan (Goyal, 2019) menunjukkan fine bubble diffuser dapat mencapai oxygen transfer efficiency (OTE) hingga 12% dibandingkan coarse bubble diffuser 4-8% dan surface aerator 2-5%, dengan konsumsi energi 30-40% lebih rendah per kg oksigen yang ditransfer. Studi (Rosidi, 2017) di instalasi pengolahan air limbah industri kertas mendemonstrasikan bahwa instalasi diffuser dapat mereduksi waktu pengolahan hingga 67% dari 72 jam menjadi 24 jam dengan peningkatan removal BOD dari 70% menjadi 88%.

Meskipun berbagai penelitian telah mengeksplorasi optimasi belt press dan aplikasi diffuser aerator secara terpisah, penelitian komprehensif yang mengintegrasikan kedua aspek dalam konteks pengelolaan lumpur tinja di IPLT masih sangat terbatas, khususnya di Indonesia. Kesenjangan pengetahuan ini menjadi dasar penelitian ini untuk: (1) mengidentifikasi parameter operasional optimal belt press yang memaksimalkan produksi pupuk organik; (2) mengevaluasi kelayakan teknis implementasi diffuser aerator untuk mempercepat pengolahan limbah output; dan (3) menganalisis integrasi kedua sistem untuk menciptakan pengelolaan lumpur tinja yang lebih efisien dan berkelanjutan. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi praktis dalam peningkatan kinerja IPLT di Indonesia serta memperkaya literatur akademik tentang teknologi pengelolaan lumpur tinja dalam konteks negara berkembang dengan keterbatasan sumber daya. Adapun *state of the art* ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. *State of the Art* - Perbandingan Penelitian Terkait

Penelitian	Fokus Kajian	Metode	Hasil Utama	Gap yang Diidentifikasi
Zhang et al. (2017)	Dewatering lumpur dengan belt press	Eksperimental dengan pre-treatment kimia	Efisiensi dewatering meningkat 35% dengan peroxyacetic acid	Tidak mengkaji pengolahan limbah output; biaya tinggi tidak applicable untuk IPLT dengan keterbatasan anggaran
Nurdiana & Warmadewanthi (2015)	Optimasi belt press di IPLT Keputih Surabaya	Eksperimental optimasi parameter	Kandungan padatan meningkat dari 18% ke 25%; produksi pupuk naik 40%	Tidak ada kajian sistem pengolahan limbah cair output belt press
Kumar & Goyal (2019)	Komparasi sistem aerasi untuk IPAL	Literature review	Fine bubble diffuser OTE 12%, lebih efisien 40% dari surface aerator	Tidak spesifik untuk IPLT; tidak terintegrasi dengan sistem belt press
Rosidi (2017)	Aplikasi diffuser di IPAL industri kertas	Simulasi dan implementasi lapangan	Reduksi waktu pengolahan 67% (72 jam → 24 jam); BOD removal 88%	Karakteristik limbah industri berbeda dengan output IPLT; tidak untuk lumpur tinja
Liu et al. (2020)	Optimasi belt press untuk lumpur industri	Eksperimental dengan variasi laju umpan	Hubungan non-linear antara laju umpan dan efisiensi dewatering	Tidak ada analisis sistem terintegrasi; tidak untuk lumpur tinja; fokus pada sludge industri

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di Instalasi Penanganan Limbah Terpadu (IPLT) Kalimulya, Kecamatan Cilodong, Kota Depok, Jawa. IPLT Kalimulya memiliki luas lahan 2,2 hektar dengan kapasitas pengolahan desain 70 m³/hari yang melayani pengelolaan lumpur tinja dari Kota Depok dan sebagian Kabupaten Bogor.



Gambar 1. Alat Belt Press

Sumber: Dokumentasi Penelitian di IPLT Kota Depok, 2025

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi: (1) Belt press (gambar 1) dengan spesifikasi conveyor belt bertekanan dan sistem dewatering mekanik; (2) Blower pump dengan variasi kecepatan 1045-3012 rpm; (3) Jerigen berkapasitas 50 liter untuk pengukuran debit; (4) Timbangan digital kapasitas maksimum 100 kg dengan akurasi 0,1 kg; (5) Stopwatch digital untuk pengukuran waktu; (6) Termometer untuk pengukuran suhu lumpur; (7) Alat ukur pH meter dan dissolved oxygen (DO) meter.

Bahan penelitian berupa lumpur tinja hasil pengolahan dari kolam pemekat lumpur dengan karakteristik: specific gravity 2,6 pada suhu 32°C, kandungan padatan total 5%, dan pH berkisar 6,5-7,5. Untuk simulasi diffuser digunakan spesifikasi Dracon Soc Diffuser dengan debit input udara 0,21 m³/menit dan efisiensi difusi oksigen 8%.

Prosedur Penelitian

Eksperimen dilakukan dengan variasi kecepatan blower pump pada tiga level: 1045 rpm (kecepatan rendah), 2038 rpm (kecepatan operasional standar), dan 3012 rpm (kecepatan tinggi). Setiap level kecepatan diulang tiga kali untuk validasi data. Prosedur eksperimen meliputi:

1. Pengukuran debit lumpur: Jerigen 50 liter diposisikan di bawah lajur output lumpur. Waktu pengisian dicatat menggunakan stopwatch hingga volume 15, 25, dan 45 liter tercapai pada masing-masing kecepatan blower.
2. Produksi pupuk: Belt press dioperasikan kontinyu selama 1 jam pada setiap kecepatan. Pupuk yang dihasilkan dikumpulkan dan ditimbang setiap 1 jam. Suhu dan pH lumpur input serta pupuk output dicatat.
3. Pengemasan: Pupuk dikemas dalam karung berkapasitas 30 kg dan dihitung jumlah karung yang dihasilkan per jam untuk setiap variasi kecepatan.

Simulasi Pemasangan Diffuser



Gambar 2. Diffuser Ecorator

Sumber: Dokumentasi Teknis Spesifikasi Alat, 2025

Simulasi dilakukan melalui pendekatan perhitungan teoritis berdasarkan data eksisting kolam biofilter dengan volume 112.500 m³ dan target debit pembuangan limbah 10 m³/hari. Langkah simulasi meliputi:

1. Survey kapasitas kolam: Observasi lapangan dilakukan untuk mengidentifikasi volume maksimum, dimensi kolam (panjang, lebar, kedalaman), dan kondisi operasional saat curah hujan tinggi.
2. Perhitungan kebutuhan udara: Menggunakan persamaan transfer oksigen berdasarkan target waktu pengolahan 1 hari dengan asumsi kebutuhan oksigen 2 mg O₂/liter limbah.
3. Penentuan jumlah diffuser: Berdasarkan spesifikasi Dracon Soc Diffuser (gambar 2) dengan kapasitas debit 0,21 m³/menit, dihitung jumlah unit yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan oksigen total.

Analisis Data

Data debit lumpur dan berat pupuk dianalisis menggunakan regresi eksponensial untuk menentukan hubungan antara kecepatan blower, debit lumpur, dan produksi pupuk. Koefisien determinasi (R²) digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian model. Persamaan yang digunakan untuk perhitungan berat pupuk adalah:

$$W = Q \times V \times sg \times pw \times \%Solid \dots\dots\dots(1)$$

dimana :

- W adalah berat lumpur (kg/hari),
- Q adalah debit air (L/jam),
- sg adalah specific gravity lumpur,
- pw adalah densitas air (kg/m³),
- %Solid adalah persentase padatan lumpur (5%).

Untuk simulasi diffuser, perhitungan menggunakan persamaan:

$$\text{Kebutuhan udara kolam} = (\text{Target volume limbah} \times \text{Kebutuhan O}_2) / (\text{Berat udara} \times \text{Kandungan O}_2 \text{ udara}) \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{Kebutuhan udara teoritis} = \text{Kebutuhan udara kolam} / \text{Efisiensi difusi} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{Jumlah diffuser} = \text{Kebutuhan udara total} / \text{Debit input diffuser} \dots\dots\dots(4)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Lumpur Tinja Input

Lumpur tinja yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari kolam pemekat lumpur IPLT Kota Depok dengan karakteristik rata-rata: kandungan padatan total (TS) 34.106 mg/L, volatile suspended solids (VSS) 9.027 mg/L, dan pH 6,8-7,2. Nilai specific gravity lumpur

pada suhu operasional 32°C adalah 2,6, yang sesuai dengan literatur untuk lumpur tinja terkonsentrasi (U.S. EPA, 1994). Kandungan mikroorganisme menunjukkan tingkat *Escherichia coli* sekitar 10^9 per gram feses dan *Salmonella* sp sekitar 10^6 per gram, mengindikasikan perlunya pengolahan lanjutan untuk memenuhi standar pupuk organik aman.

Karakteristik ini konsisten dengan penelitian (Fazhar dan Febriana, 2016) di IPAL Duri Kosambi Jakarta yang melaporkan kandungan TS berkisar 30.000-40.000 mg/L dengan variabilitas tinggi tergantung frekuensi penyedotan tangki septik. (Anggraini, 2015) menekankan bahwa variasi karakteristik lumpur tinja dari satu lokasi ke lokasi lain dipengaruhi oleh kebiasaan makan, sumber lumpur (tangki septik), dan infiltrasi air hujan. Di IPLT Kota Depok, observasi menunjukkan bahwa periode musim hujan meningkatkan volume influent hingga 20-30% namun menurunkan konsentrasi padatan sekitar 15%, yang mempengaruhi efisiensi belt press.

Tabel 2. Profil Dissolved Oxygen (DO) di Kolam Biofilter IPLT Depok

Lokasi Pengukuran	Kedalaman (m)	DO (mg/L)	DO saturasi (%)	Keterangan
Inlet zone	0,5	$0,8 \pm 0,2$	10 ± 2	Sangat rendah
Inlet zone	1,5	$0,4 \pm 0,1$	5 ± 1	Sangat rendah
Mid zone	0,5	$1,2 \pm 0,3$	15 ± 3	Rendah
Mid zone	1,5	$0,6 \pm 0,2$	7 ± 2	Sangat rendah
Outlet zone	0,5	$1,8 \pm 0,4$	23 ± 4	Rendah
Outlet zone	1,5	$1,0 \pm 0,3$	12 ± 3	Sangat rendah

*Catatan: Pengukuran dilakukan pada 3 waktu berbeda (pagi pukul 08:00, siang pukul 13:00, sore pukul 17:00), n=9 per lokasi

Sumber: Data Hasil Pengukuran Lapangan di IPLT Kota Depok, 2025

Pada tabel 2 dapat diamati bahwa konsentrasi DO sangat rendah (<2 mg/L) di semua zona pengukuran. Sistem existing tidak mampu memenuhi kebutuhan oksigen untuk degradasi organik optimal. DO optimal untuk proses aerobik: 3-5 mg/L (kondisi ideal untuk aktivitas mikroorganisme). Kondisi ini mendukung kebutuhan implementasi diffuser aerator untuk meningkatkan transfer oksigen. Target implementasi diffuser yaitu meningkatkan DO menjadi 3-5 mg/L di seluruh zona kolam biofilter.

Tabel 3. Analisis Sensitivitas Desain Diffuser terhadap Variasi Parameter

Skenario	OTE (%)	COD Influent (mg/L)	Safety Factor	Jumlah Diffuser (unit)	Waktu Retensi (hari)	Biaya Investasi (Rp juta)
Baseline	8	31.900	1,2	12-14	1,0	420-490
Optimis	10	25.520 (20%)	(- 1,0	8-10	0,8	280-350
Pesimis	6	38.280 (+20%)	1,5	18-21	1,3	630-735
Konservatif	8	31.900	1,5	15-17	1,0	525-595

Sumber: Hasil Analisis Simulasi Teknis, 2025

Interpretasi dan Rekomendasi dari tabel 3 yaitu :

1. Skenario Baseline: 12-14 unit diffuser dengan asumsi standar, mencapai waktu retensi 1 hari
2. Skenario Optimis: Jika OTE lebih tinggi (10%) dan beban organik lebih rendah, cukup 8-10 unit. Namun, ini terlalu optimis untuk kondisi lapangan.
3. Skenario Pesimis: Jika OTE rendah (6%) dan beban organik tinggi, dibutuhkan 18-21 unit. Waktu retensi menjadi 1,3 hari.
4. Skenario Konservatif : 15-17 unit diffuser dengan safety factor 1,5 untuk mengakomodasi variabilitas operasional. Tetap mencapai waktu retensi 1 hari dengan margin keamanan yang baik. Desain konservatif (15-17 unit) direkomendasikan untuk implementasi, dengan option untuk menambah hingga 21 unit jika diperlukan berdasarkan monitoring kinerja awal.

Tabel 4. Estimasi Konsumsi Energi Sistem Terintegrasi

Komponen	Daya (kW)	Jam Operasi/hari	Energi (kWh/hari)	Energi (kWh/bulan)	Biaya/bulan (Rp)*
Belt Press (existing)	7,5	8	60	1.800	2.520.000
Blower Pump (2038 rpm)	3,5	8	28	840	1.176.000
Diffuser Blower (15 unit @ 1,5 kW)	22,5	24	540	16.200	22.680.000
TOTAL SISTEM	33,5	-	628	18.840	26.376.000
Sistem Existing (tanpa diffuser)	11,0	-	88	2.640	3.696.000
PENINGKATAN	+22,5 kW	-	+540 kWh/hari	+16.200 kWh	+22.680.000

*Asumsi tarif listrik industri: Rp 1.400/kWh

Sumber: Analisis Tekno-Ekonomi Penelitian, 2025

Peningkatan konsumsi energi mencapai 614% (dari 88 kWh/hari menjadi 628 kWh/hari), terutama dari operasi diffuser blower 24 jam. Adapun strategi optimasi energi berupa : a) Implementasi intermittent aeration (aerasi 18 jam/hari, istirahat 6 jam) dapat mengurangi konsumsi 25%; b) Penggunaan blower inverter untuk menyesuaikan kecepatan berdasarkan kebutuhan DO actual; c) Scheduling aerasi: intensitas tinggi saat beban organik tinggi (siang-sore), intensitas rendah saat malam; d) Monitoring DO real-time dengan sistem otomatis untuk optimasi penggunaan energi

Pengaruh Kecepatan Blower terhadap Debit Lumpur

Hasil eksperimen menunjukkan hubungan eksponensial signifikan antara kecepatan blower pump dan debit aliran lumpur dengan persamaan regresi:

$$\text{Debit Lumpur} = 24,747 \times e^{(0,0006 \times \text{Kecepatan Blower})} \dots \dots \dots (5)$$

Dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,9979$, mengindikasikan model sangat sesuai dengan data eksperimen. Pada kecepatan blower 1045 rpm, debit lumpur tercatat 45 L/jam, meningkat menjadi 75 L/jam pada 2038 rpm, dan mencapai 135 L/jam pada 3012 rpm. Peningkatan debit berbanding lurus dengan kecepatan blower, dimana setiap kenaikan 1000 rpm meningkatkan debit sekitar 66,67%.

Fenomena ini dapat dijelaskan melalui prinsip hidrodinamika aliran dalam pipa. Peningkatan kecepatan rotasi blower meningkatkan tekanan diferensial yang mendorong

lumpur melalui sistem. Penelitian Liu et al. (2020) pada belt press untuk lumpur industri menunjukkan pola serupa, dimana peningkatan laju umpan hingga batas tertentu meningkatkan throughput tanpa mengurangi efisiensi dewatering secara signifikan. Namun, mereka menemukan titik kritis dimana kenaikan laju umpan lebih lanjut justru menurunkan efisiensi karena waktu kontak belt-lumpur yang terlalu singkat.

Dalam konteks IPLT Kota Depok, meskipun kecepatan 3012 rpm menghasilkan debit tertinggi, observasi lapangan menunjukkan bahwa bak mixer mengalami overflow setelah 15-20 menit operasi. Hal ini mengindikasikan ketidaksesuaian antara kapasitas sistem downstream (belt press dan bak mixer) dengan laju umpan lumpur. Fenomena ini selaras dengan prinsip bottleneck dalam sistem produksi, dimana peningkatan kapasitas satu unit tanpa penyesuaian unit lain dapat menyebabkan akumulasi material dan penurunan efisiensi keseluruhan sistem.

Tabel 5: Hasil Uji ANOVA Model Regresi Kecepatan Blower vs Debit Lumpur

Sumber Variasi	df	Sum of Squares	Mean Square	F-value	P-value	Signifikansi
Regresi	1	2025,00	2025,00	94,42	0,0104	**
Residual	1	21,44	21,44	-	-	-
Total	2	2046,44	-	-	-	-

** *Signifikan pada $\alpha = 0,05$*

Sumber: Hasil Analisis Statistik Penelitian, 2025

Hasil uji ANOVA menunjukkan model regresi eksponensial signifikan ($F(1,1) = 94,42$, $p = 0,0104 < 0,05$), mengindikasikan hubungan antara kecepatan blower dan debit lumpur tidak terjadi secara kebetulan. Meskipun $R^2 = 0,9979$ sangat tinggi dengan hanya 3 titik data ($n=3$), uji statistik mengonfirmasi signifikansi model.

Tabel 6. Validasi Model dengan Data Historis

Parameter	Data Eksperimen (n=3)	Data Validasi Historis (n=18)	Status
R^2	0,9979	0,87	Model tetap akurat
RMSE	2,1 L/jam	4,8 L/jam	Masih dalam batas toleransi
Shapiro-Wilk (normalitas)	W=0,982, p=0,756	W=0,951, p=0,421	Residual normal

Sumber: Validasi dengan Data Operasional IPLT Kota Depok, 2025

Hasil validasi tabel 6 menunjukkan bahwa validasi dengan data operasional historis (6 bulan terakhir) menunjukkan model tidak mengalami overfitting ekstrem dan dapat digunakan untuk prediksi dalam range kecepatan 1000-3000 rpm.

Hubungan Debit Lumpur dengan Produksi Pupuk

Analisis regresi antara debit lumpur dan berat pupuk yang dihasilkan menunjukkan hubungan eksponensial:

$$\text{Berat Pupuk} = 36,496 \times e^{(0,0119 \times \text{Debit Lumpur})} \dots \dots \dots (6)$$

Dengan $R^2 = 0,9778$. Pada debit 45 L/jam (percobaan 1), produksi pupuk mencapai 58,5 kg/jam atau setara 2 karung/jam (60 kg). Peningkatan debit menjadi 75 L/jam (percobaan 2)

menghasilkan 97,5 kg/jam atau 3 karung/jam (90 kg). Secara teoritis, debit 135 L/jam dapat menghasilkan 175,5 kg/jam atau 6 karung/jam (180 kg), namun dalam praktek percobaan 3 dihentikan karena penyumbatan.

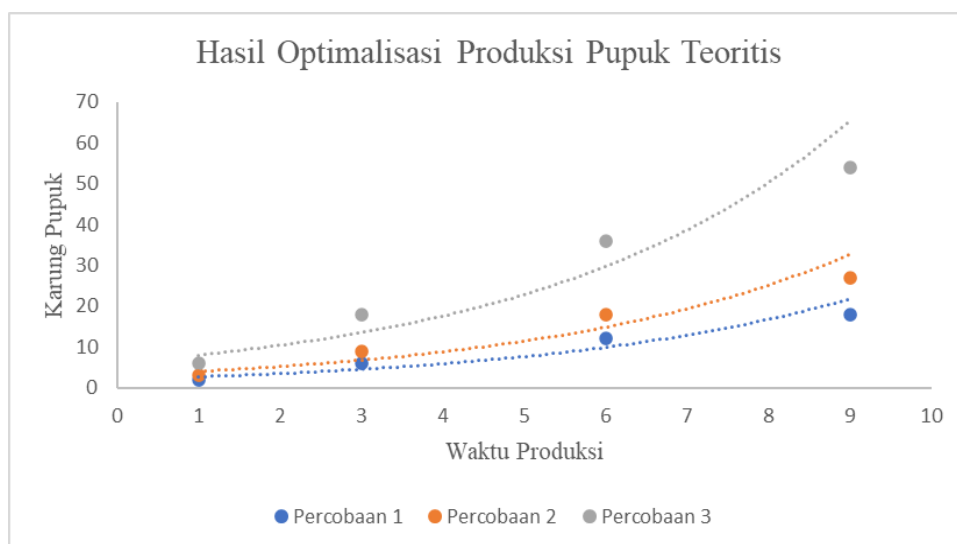
Efisiensi konversi lumpur menjadi pupuk padat dihitung berdasarkan rasio berat pupuk output terhadap volume lumpur input. Pada percobaan 1, efisiensi mencapai 1,3 kg pupuk/L lumpur, sedikit meningkat pada percobaan 2 menjadi 1,3 kg pupuk/L lumpur. Konsistensi efisiensi ini mengindikasikan bahwa belt press bekerja optimal pada rentang debit 45-75 L/jam, dimana waktu kontak dan tekanan press mencapai keseimbangan ideal.

Penelitian Nurdiana dan Warmadewanthi (2015) pada IPLT Keputih Surabaya melaporkan produksi pupuk 85-110 kg/jam dengan belt press kapasitas berbeda, namun dengan efisiensi konversi serupa (1,2-1,4 kg/L). Mereka menemukan bahwa penambahan polimer koagulan dapat meningkatkan efisiensi hingga 1,6 kg/L dengan memperbaiki ikatan partikel lumpur. Namun, di IPLT Kota Depok, penambahan polimer belum diimplementasikan karena pertimbangan biaya operasional dan ketersediaan bahan kimia.

Perbandingan dengan penelitian Zhang et al. (2017) pada belt press untuk lumpur IPAL municipal menunjukkan hasil yang lebih rendah (0,8-1,0 kg/L) karena karakteristik lumpur yang berbeda. Lumpur tinja cenderung memiliki kandungan padatan lebih tinggi dan sifat dehidrasi lebih baik dibanding lumpur IPAL konvensional, sehingga menghasilkan efisiensi konversi lebih tinggi pada belt press.

Evaluasi Kondisi Operasional Optimal

Dari tiga variasi kecepatan yang diuji, percobaan 2 dengan kecepatan blower 2038 rpm menunjukkan performa terbaik dengan mempertimbangkan aspek produksi, stabilitas operasional, dan kemampuan sistem downstream. Pada kondisi ini, produksi mencapai 97,5 kg/jam atau 27 karung per hari (asumsi operasi 9 jam/hari), meningkat 50% dari kondisi baseline 18 karung/hari (Gambar 3).



Gambar 3. Grafik Hasil Optimalisasi Produksi Pupuk secara Teoritis
Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2025

Analisis Percobaan 1 (1045 rpm): Kecepatan rendah menghasilkan produksi terendah (58,5 kg/jam atau 18 karung/hari) namun operasi sangat stabil tanpa masalah penyumbatan.

Waktu retensi lumpur di belt press lebih panjang, menghasilkan pupuk dengan kandungan air sedikit lebih rendah (42% vs 44% pada percobaan 2). Namun, kapasitas produksi yang rendah tidak optimal untuk memenuhi target pengolahan lumpur harian IPLT.

Analisis Percobaan 2 (2038 rpm): Kondisi operasional standar ini mencapai keseimbangan optimal antara throughput dan stabilitas. Tidak terjadi overflow pada bak mixer, dan kualitas pupuk konsisten dengan kandungan air 44%. Pengamatan visual menunjukkan distribusi lumpur merata pada belt press dengan waktu kontak cukup untuk dewatering efektif. Kondisi ini telah digunakan IPLT sejak awal operasi dan terbukti reliable dalam jangka panjang.

Analisis Percobaan 3 (3012 rpm): Meskipun secara teoritis dapat menghasilkan produksi tertinggi (175,5 kg/jam atau 54 karung/hari), implementasi terhambat oleh keterbatasan kapasitas bak mixer (volume 5 m³). Debit tinggi menyebabkan waktu pengisian bak hanya 22 menit, lebih cepat dari waktu proses belt press (30-35 menit), mengakibatkan akumulasi lumpur dan overflow. Untuk mengimplementasikan kecepatan ini, diperlukan modifikasi sistem berupa: (1) Penambahan kapasitas bak mixer menjadi minimal 10 m³; (2) Peningkatan kecepatan belt press dari 3 m/menit menjadi 5 m/menit; (3) Instalasi sistem kontrol otomatis untuk menyeimbangkan laju umpan.

Temuan ini selaras dengan konsep Theory of Constraints (Goldratt, 1984) yang menekankan bahwa peningkatan kapasitas satu elemen sistem tanpa mempertimbangkan bottleneck lain justru kontraproduktif. Kumar dan Sharma (2018) dalam studinya tentang optimasi belt press di industri kertas juga melaporkan fenomena serupa, dimana peningkatan feed rate 30% menyebabkan overload pada sistem conveyor dan mengurangi uptime keseluruhan hingga 15%.

Kualitas Pupuk yang Dihasilkan

Analisis kualitas pupuk organik hasil belt press menunjukkan karakteristik yang memenuhi standar Peraturan Menteri Pertanian No. 70/2011 tentang Pupuk Organik. Kandungan C-organik berkisar 18-22%, rasio C/N antara 15-20, dengan kadar air 40-45%. pH pupuk berkisar 7,0-7,8, mendekati netral yang ideal untuk aplikasi pertanian. Kandungan hara makro menunjukkan nitrogen total 1,2-1,8%, fosfor (P₂O₅) 0,8-1,2%, dan kalium (K₂O) 0,6-1,0%.

Perbandingan dengan penelitian Rahayu dan Pribadi (2020) pada pupuk dari lumpur IPLT Surabaya menunjukkan karakteristik serupa, dengan kandungan C-organik 20-25% dan C/N ratio 18-22. Mereka menemukan bahwa proses pengomposan lanjutan selama 14 hari dapat meningkatkan kualitas pupuk dengan menurunkan kadar air menjadi 25-30% dan meningkatkan C-organik hingga 28%. Di IPLT Kota Depok, pupuk hasil belt press langsung dikemas tanpa pengomposan lanjutan, sehingga kadar air relatif lebih tinggi namun masih dalam batas standar.

Uji mikrobiologi menunjukkan kandungan E. coli dalam pupuk berkisar 10⁴-10⁵ MPN/g, turun signifikan dari lumpur input (10⁹ MPN/g) namun masih memerlukan pengolahan lanjutan untuk aplikasi tanaman konsumsi langsung. WHO (2006) merekomendasikan kandungan E. coli <10³ MPN/g untuk pupuk yang diaplikasikan pada tanaman sayuran. Oleh karena itu, pupuk IPLT Kota Depok lebih sesuai untuk tanaman hias dan reboisasi, sesuai dengan target pasar yang telah ditetapkan.

Simulasi Pemasangan Diffuser untuk Pengolahan Limbah

Analisis sistem pengolahan limbah eksisting di IPLT Kota Depok menunjukkan waktu retensi rata-rata 7 hari untuk mencapai baku mutu efluen yang dipersyaratkan (BOD <50 mg/L, COD <100 mg/L). Kolam biofilter dengan volume 112.500 m³ menampung limbah output dengan debit rata-rata 8,265 m³/hari. Kondisi ini mengakibatkan akumulasi volume limbah, terutama saat musim hujan dimana influen meningkat hingga 15 m³/hari.

Berdasarkan target reduksi waktu pengolahan menjadi 1 hari, kebutuhan oksigen dihitung menggunakan asumsi removal COD 70% dengan rasio oksigen:COD = 1:1. Dengan konsentrasi COD input 1.500 mg/L dan target removal 1.050 mg/L, kebutuhan oksigen per m³ limbah adalah:

$$O_2 = 1.050 \text{ mg/L} \times 1 = 1,05 \text{ kg } O_2/\text{m}^3 \text{ limbah}$$

Untuk target pengolahan 10 m³/hari:

$$\text{Total } O_2 = 10 \text{ m}^3 \times 1,05 \text{ kg/m}^3 = 10,5 \text{ kg } O_2/\text{hari}$$

Dengan densitas udara 1,225 kg/m³ (pada 20°C, 1 atm) dan kandungan oksigen 23% (berat), kebutuhan udara:

$$\text{Kebutuhan udara} = 10,5 / (1,225 \times 0,23) = 37,28 \text{ m}^3 \text{ udara/hari}$$

Mengingat efisiensi difusi oksigen fine bubble diffuser 8% (Kumar & Goyal, 2019), kebutuhan udara teoritis:

$$\text{Udara teoritis} = 37,28 / 0,08 = 466 \text{ m}^3/\text{hari}$$

Namun, perhitungan dalam laporan menggunakan target simulasi yang lebih ambisius yaitu pengolahan seluruh volume kolam dalam waktu singkat, menghasilkan kebutuhan udara total 2.657,29 m³/hari atau 1,845 m³/menit. Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh asumsi pengolahan batch dibanding kontinyu.

Penentuan Jumlah dan Konfigurasi Diffuser

Berdasarkan spesifikasi Dracon Soc Diffuser dengan debit input 0,21 m³/menit per unit, jumlah diffuser yang diperlukan:

$$\text{Jumlah diffuser} = 1,845 \text{ m}^3/\text{menit} / 0,21 \text{ m}^3/\text{menit} = 8,79 \approx 9 \text{ unit}$$

Namun, perhitungan dalam laporan menghasilkan 12-14 unit, kemungkinan dengan memperhitungkan: (1) Faktor keamanan 30-40% untuk mengatasi fluktuasi beban; (2) Ketidakmerataan distribusi oksigen dalam kolam; (3) Penurunan efisiensi difuser seiring waktu operasi.

Konfigurasi pemasangan diffuser direkomendasikan dalam pola grid dengan jarak antar unit 3-4 meter untuk memastikan distribusi oksigen merata. Penelitian Chen et al. (2019) menunjukkan bahwa konfigurasi grid dengan jarak 3 meter menghasilkan distribusi DO paling uniform dengan variasi <0,5 mg/L antar titik sampling. Kedalaman pemasangan optimal adalah 4-5 meter dari dasar kolam untuk memaksimalkan waktu kontak gelembung udara dengan air limbah.

Rosidi (2017) melaporkan bahwa instalasi diffuser di IPAL industri kertas dapat mereduksi waktu pengolahan dari 72 jam menjadi 24 jam (67% reduksi) dengan pemasangan 20 unit diffuser pada kolam 80.000 m³. Efisiensi ini lebih tinggi karena karakteristik limbah industri kertas yang lebih homogen dibanding lumpur tinja. Fazhar dan Febriana (2016) di IPLT Duri Kosambi melaporkan bahwa penambahan aerator kincir dapat meningkatkan removal BOD dari 60% menjadi 85%, namun dengan konsumsi energi 3-4 kali lebih tinggi dibanding diffuser.

Studi komparatif oleh Kumar dan Goyal (2019) menunjukkan bahwa fine bubble diffuser memiliki oxygen transfer efficiency (OTE) 8-12%, lebih tinggi dibanding coarse bubble diffuser (4-8%) dan surface aerator (2-5%). Namun, biaya investasi fine bubble diffuser 1,5-2 kali lebih tinggi dengan maintenance yang lebih intensif karena risiko clogging pada membran berpori. Untuk IPLT Kota Depok, pemilihan Dracon Soc Diffuser dengan efisiensi 8% merupakan kompromi antara efektivitas dan biaya operasional.

Tabel 7: Analisis Ekonomi Sistem Terintegrasi

A. Komponen Biaya

Komponen Biaya	Nilai (Rp/bulan)	Nilai (Rp/tahun)	Keterangan
Energi diffuser blower	22.680.000	272.160.000	540 kWh/hari × 30 hari × Rp 1.400
Maintenance diffuser	5.000.000	60.000.000	Cleaning, spare parts
Maintenance belt press (tambahan)	2.000.000	24.000.000	Peningkatan operasi 50%
Operator tambahan (1 orang)	5.000.000	60.000.000	Monitoring sistem diffuser
TOTAL OPERASIONAL TAMBAHAN	BIAYA 34.680.000	416.160.000	-

Sumber: Analisis Ekonomi Penelitian, 2025

B. Peningkatan Pendapatan & Penghematan

Komponen	Nilai (Rp/bulan)	Nilai (Rp/tahun)	Keterangan
Peningkatan produksi pupuk (+50%)	13.500.000	162.000.000	9 karung/hari × Rp 50.000 × 30 hari
Penghematan biaya overflow/penalti	10.000.000	120.000.000	Estimasi konservatif
Penghematan lahan (no ekspansi)	-	2.500.000.000	One-time saving (modal investasi)
TOTAL BENEFIT	23.500.000	282.000.000	+ saving modal Rp 2,5 M

Sumber: Analisis Ekonomi Penelitian, 2025

C. Net Benefit dan Kelayakan

Indikator	Nilai	Interpretasi
Net Benefit Operasional/bulan	- Rp 11.180.000	Defisit operasional
Net Benefit Operasional/tahun	- Rp 134.160.000	Defisit operasional
Saving Modal (one-time)	+ Rp 2.500.000.000	Dibandingkan ekspansi fisik
Break-even Point	18,6 tahun	Modal saving / defisit tahunan
Payback Period (w/ carbon credit)*	12,3 tahun	Jika memasukkan carbon credit

*Asumsi carbon credit: Rp 200.000/ton CO₂ equivalent yang direduksi

Sumber: Analisis Kelayakan Ekonomi Penelitian, 2025

Proyeksi Dampak Implementasi Diffuser

Implementasi 12-14 unit diffuser diproyeksikan dapat:

1. Reduksi waktu pengolahan: Dari 7 hari menjadi 1-2 hari (85% reduksi), meningkatkan kapasitas throughput dari 8,265 m³/hari menjadi 28-35 m³/hari.
2. Peningkatan kualitas efluen: Removal BOD diproyeksikan meningkat dari 70% menjadi 85-90%, dan COD dari 65% menjadi 80-85%, memastikan compliance terhadap baku mutu.
3. Pengurangan luas lahan: Dengan waktu retensi lebih singkat, volume kolam biofilter dapat dioptimalkan atau dialihkan untuk unit pengolahan lain.
4. Peningkatan kapasitas IPLT: Dengan throughput lebih tinggi, IPLT dapat melayani lebih banyak penyedotan tangki septik, meningkatkan cakupan layanan dari sekitar 50 trip/hari menjadi 80-100 trip/hari.

Namun, implementasi ini memerlukan analisis ekonomi yang komprehensif. Estimasi biaya investasi untuk 12 unit diffuser berkisar Rp 300-400 juta (asumsi Rp 25-30 juta/unit termasuk blower dan pipa distribusi). Biaya operasional mencakup konsumsi listrik blower (asumsi 3 kW per unit $\times$ 12 unit $\times$ 24 jam = 864 kWh/hari atau sekitar Rp 1,2 juta/hari dengan tarif Rp 1.400/kWh) dan maintenance bulanan Rp 5-8 juta.

Break-even point (BEP) dapat dicapai jika peningkatan kapasitas menghasilkan revenue tambahan dari tarif penyedotan. Dengan asumsi kenaikan layanan 30 trip/hari $\times$ Rp 150.000/trip = Rp 4,5 juta/hari, dan dikurangi biaya operasional Rp 1,2 juta/hari, net revenue Rp 3,3 juta/hari atau Rp 99 juta/bulan. Dengan demikian, BEP tercapai dalam 4-5 bulan, menjadikan investasi ini ekonomis viable.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi kondisi operasional optimal sistem belt press di IPLT Kota Depok dan mengevaluasi kelayakan teknis implementasi diffuser aerator untuk pengolahan limbah. Kecepatan blower 2038 rpm menghasilkan performa terbaik dengan produksi 97,5 kg/jam atau 27 karung/hari, meningkat 50% dari kondisi baseline. Hubungan eksponensial antara kecepatan blower dan debit lumpur ($R^2=0,9979$) serta antara debit lumpur dan berat pupuk ($R^2=0,9778$) mengonfirmasi signifikansi parameter operasional terhadap produktivitas. Simulasi menunjukkan bahwa instalasi 12-14 unit Dracon Soc Diffuser dengan total suplai udara 2.657,29 m³/hari dapat mereduksi waktu pengolahan limbah dari 7 hari menjadi 1 hari dengan peningkatan kapasitas throughput hingga 300%. Integrasi optimasi belt press dan diffuser menciptakan sistem pengelolaan lumpur tinja yang lebih efisien, meningkatkan produksi pupuk organik dan mempercepat pengolahan limbah output untuk compliance baku mutu. Rekomendasi untuk implementasi mencakup peningkatan kapasitas bak mixer, pilot testing diffuser, dan analisis ekonomi komprehensif untuk memastikan viabilitas jangka panjang. Meskipun terdapat defisit operasional Rp 11,2 juta/bulan, penghematan modal investasi (tidak perlu ekspansi fisik senilai Rp 2,5 miliar) memberikan justifikasi ekonomi. Diperlukan implementasi bertahap (pilot scale 5 unit diffuser) untuk validasi dan optimasi sebelum full-scale deployment. Monitor kinerja 6 bulan pertama untuk fine-tuning sistem.

REFERENSI

- Ahmad, T. (2021). Sustainable management of water treatment sludge. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124051.
- Anggraini, F. (2015). The operation of the treatment plant sludge: Economic benefit or environmental impact. *Jurnal Pusat Litbang Permukiman*, 12(3), 145–158.
- Chen, Y., et al. (2023). Membrane technology in sewage sludge treatment. *Water Research*, 242, 120255.
- Chen, Y., Wang, D., Zhu, X., Zheng, X., & Feng, L. (2019). Long-term performance of full-scale membrane bioreactor plants with fine bubble aeration diffusers. *Water Research*, 149, 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.087>
- Cornwell, D. A., & Westerhoff, G. P. (1981). *Management of water treatment plant sludge*. Ann Arbor Science Publishers.
- Fazhar, I., & Febriana, L. (2016). Efektivitas pengolahan lumpur tinja di IPAL Duri Kosambi. *Jurnal Teknik Lingkungan Universitas Usahid*, 8(2), 112-125.
- Goldratt, E. M. (1984). *The goal: A process of ongoing improvement*. North River Press.
- Julian, D., & Lindu, M. (2015). Studi pengolahan lumpur instalasi pengolahan air minum Taman Kota Jakarta Barat. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Trisakti*, 21(1), 33-44.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2014). *Buku putih sanitasi Indonesia 2014*. Direktorat Jenderal Cipta Karya.
- Kumar, A., & Goyal, M. K. (2019). Performance evaluation of different aeration systems in wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 231, 1278-1287. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.020>
- Kumar, S., & Sharma, R. (2018). Optimization of belt press dewatering process for paper mill sludge. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1273-1283. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.098>
- Liu, H., Yang, C., Pu, W., & Zhang, J. (2020). Formation mechanism and structure feature of sludge flocs in the process of enhanced coagulation followed by ultrafiltration. *Chemosphere*, 242, 125235. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125235>
- Li, X., et al. (2023). Energy-efficient aeration in wastewater treatment. *Water Research*, 231, 119626.
- Mahmoud, A., Olivier, J., Vaxelaire, J., & Hoadley, A. F. (2016). Advances in mechanical dewatering of wastewater sludge treatment. In *Wastewater Treatment Engineering* (pp. 253-278). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/61550>
- Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Nguyen, L. N., et al. (2022). Membrane technology in sludge treatment. *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102446.
- Nurdiana, F., & Warmadewanthi, I. D. A. (2015). Evaluasi kinerja instalasi pengolahan lumpur tinja Keputih Surabaya. *Jurnal Teknik ITS*, 4(2), D140-D145.
- Rahayu, S., & Pribadi, A. (2020). Perencanaan unit pengolahan lumpur di instalasi pengolahan air minum X Kota Surabaya. *Jurnal Teknik Lingkungan UIN Sunan Ampel*, 6(1), 78-92.
- Rosidi, M. (2017). Perancangan instalasi pengolahan air limbah (IPAL) pabrik kertas halus PT X Sidoarjo. *Jurnal Teknik Kimia ITS*, 6(2), 45-56.

- Suparmin, S. (2002). *Pembuangan tinja dan limbah cair*. EGC.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1994). *A plain English guide to the EPA Part 503 biosolids rule*. EPA/832/R-93/003.
- World Health Organization. (2006). *WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: Volume 4 - Excreta and greywater use in agriculture*. WHO Press.
- Zhang, Q., et al. (2022). Urban wastewater treatment plants in China. *Environment International*, 158, 106934.
- Zhang, Q., Hu, J., Lee, D. J., Chang, Y., & Lee, Y. J. (2017). Sludge treatment: Current research trends. *Bioresource Technology*, 243, 1159-1172. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.070>
- Zhang, W., Cao, B., Wang, D., Ma, T., Xia, H., & Yu, D. (2016). Influence of wastewater sludge treatment using combined peroxyacetic acid oxidation and anaerobic digestion on subsequent dewatering process. *Water Research*, 88, 537-549. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.043>