

## Pemanfaatan Lumpur Instalasi Pengolahan Air Minum sebagai Material Alternatif dalam Pembuatan *Paving Block*

**Sophia Shanti Meilani<sup>\*1</sup>, Rayhan Alfatah<sup>2</sup>, Wahyu Kartika<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Bhayangkara Jakarta Raya, Indonesia

e-mail: <sup>\*1</sup>sophia.shanti@dsn.ubharajaya.ac.id, <sup>2</sup>alfatahreihan@gmail.com,

<sup>3</sup>wahyu.kartika@dsn.ubharajaya.ac.id

### **Abstract**

*The demand for clean water in urban areas is mostly met through river water treatment. The treatment process produces by-product in the form of sludge, which can cause negative impacts if discharged into the environment. This study aims to evaluate the potential use of sludge waste from drinking water treatment plants (DWTP) as a substitute material for fine aggregates in the production of paving blocks. The DWTP sludge is first dried, sieved, and then mixed with cement and sand in three different compositions (15%, 25%, and 35%). After a drying process of 28 days, the samples were tested for compressive strength based on SNI 03-0691-1996. Only the 15% variation meets the D quality standard and can be used for light load areas such as gardens or yards, while the 25% and 35% variations do not meet the requirements. The results indicate that increasing the sludge content in the paving blocks leads to a decrease in compressive strength. Another advantage of utilizing sludge is reducing production costs by about 5% and supporting the principles of a circular economy.*

**Keywords :** water treatment sludge, recycle, paving block, compressive strength

### **Abstrak**

Kebutuhan air bersih di perkotaan sebagian besar dipenuhi melalui pengolahan air sungai. Dari proses pengolahan tersebut terdapat hasil sampingan berupa lumpur yang dapat menimbulkan dampak negatif jika dibuang ke lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi pemanfaatan limbah lumpur dari instalasi pengolahan air minum (IPAM) sebagai bahan substitusi agregat halus pada pembuatan paving block. Lumpur IPAM dikeringkan terlebih dulu, diayak, kemudian dicampur dengan semen dan pasir dalam tiga variasi komposisi (15%, 25%, dan 35%). Setelah proses pengeringan selama 28 hari, sampel diuji kuat tekannya berdasarkan SNI 03-0691-1996. Hanya variasi 15% yang memenuhi standar mutu D dan dapat digunakan untuk area beban ringan seperti taman atau halaman, sedangkan variasi 25% dan 35% tidak memenuhi persyaratan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kadar lumpur dalam paving block menyebabkan penurunan kuat tekan. Kelebihan lain dari pemanfaatan lumpur adalah menurunkan biaya produksi sekitar 5% dan mendukung prinsip ekonomi sirkuler.

**Kata Kunci:** Lumpur IPAM, daur ulang, paving block, kuat tekan

### **PENDAHULUAN**

Untuk memenuhi kebutuhan air bersih di perkotaan, umumnya sumber air baku yang digunakan adalah air sungai dan air tanah. Air sungai memiliki kelebihan dalam hal kuantitas, tetapi masih banyak mengandung kontaminan, seperti partikel tersuspensi yang menyebabkan kekeruhan, bahan organik dan anorganik, serta mikroorganisme. Agar menjadi air yang layak didistribusikan kepada masyarakat, air baku yang berasal dari sungai harus melewati proses pengolahan. Proses pengolahan tersebut meliputi koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, dan disinfeksi (Ahmad et al., 2016). Dari proses pengolahan tersebut dihasilkan limbah lumpur yang masih belum dimanfaatkan secara optimal dan berpotensi menimbulkan masalah terhadap lingkungan (Siswoyo et al., 2022). Jumlah lumpur yang dihasilkan dari proses pengolahan bersih mencapai 1% sampai 3% dari kuantitas air baku yang diolah (Turner et al., 2019). Limbah lumpur mengandung  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dari pengendapan partikel tersuspensi dan penggunaan koagulan berbasis alum dan besi pada proses koagulasi (Dahhou et al., 2018). Di banyak negara berkembang, limbah lumpur seringkali langsung dibuang ke badan air, meskipun sebenarnya

memiliki dampak terhadap ekosistem akuatik (Ahmad et al., 2017).

Limbah lumpur memiliki volume yang besar karena kandungan airnya yang masih tinggi, yaitu mencapai 95%. Untuk mengurangi volumenya, dapat dilakukan beberapa cara pengolahan yaitu dengan proses *thickening* dan *dewatering* (Turner et al., 2019). *Thickening* merupakan proses untuk memisahkan air dari padatan yang terkandung dalam limbah lumpur sedangkan *dewatering* adalah proses lanjutan untuk meningkatkan konsentrasi padatan dalam limbah lumpur (Qrenawi & Rabah, 2021). Sebagian besar partikel padat dalam lumpur memiliki kemiripan dengan pasir sehingga bisa dimanfaatkan sebagai material konstruksi (Ahmad et al., 2016).

*Paving block* merupakan material konstruksi yang terbuat dari campuran semen, air, dan agregat. Lumpur yang sudah dikeringkan dan dihaluskan dapat digunakan sebagai susbtitusi pasir sebagai agregat dalam pembuatan *paving block* (Siswoyo et al., 2022). Selain untuk pembuatan *paving block*, limbah lumpur dapat dimanfaatkan pengganti tanah liat dalam pembuatan batu bata (Apriani et al., 2023) dan campuran dalam pembuatan semen (Dahhou et al., 2018). Limbah lumpur juga dapat diolah untuk mendapatkan kembali kandungan alumuniumnya sehingga dapat digunakan sebagai koagulan (Bensitel et al., 2023).

Perusahaan Umum Daerah (Perumda) Tirta Bhagasaki merupakan badan usaha milik daerah yang memiliki tanggungjawab utama menyediakan layanan air bersih bagi masyarakat di kabupaten Bekasi dan sebagian wilayah kota Bekasi. Dari proses pengolahan air minum, dihasilkan limbah lumpur basah antara 20.000 hingga 30.000 m<sup>3</sup> setiap bulannya. Mengingat tingginya volume lumpur yang dihasilkan, diperlukan upaya pengolahan yang tepat untuk mencegah dampak buruk terhadap lingkungan. Pengolahan biologi dan insinerasi bukan merupakan opsi yang tepat untuk pengolahan limbah lumpur karena kandungan nutrien dan nilai kalorinya yang rendah (Turner et al., 2019). Pembuangan ke landfill di tempat pembuangan akhir (TPA) juga membutuhkan lahan yang luas dan biaya pengangkutan yang tinggi karena jumlahnya yang besar. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi pemanfaatan limbah lumpur pengolahan air minum dalam pembuatan *paving block* yang memenuhi standar kekuatan dan ketahanan yang dibutuhkan material konstruksi dan nilai ekonomis yang didapatkan dari pemanfaatan limbah lumpur.

## METODE PENELITIAN

### Preparasi Limbah Lumpur

Analisis fisika dan kimia dilakukan pada limbah lumpur basah yang berasal dari Perumda Tirta Bhagasaki. Setelah itu, lumpur dikeringkan terlebih dahulu hingga kandungan airnya berkurang. Selanjutnya lumpur yang sudah kering diayak dengan saringan no.4 (ukuran lubang 4,8 mm) untuk memenuhi standar maksimum ukuran agregat halus.

### Komposisi dan Pencampuran Bahan

Lumpur dicampur dengan semen dan pasir untuk pembuatan *paving block*. Semen berfungsi sebagai bahan perekat utama, pasir memberikan kekuatan pada *paving block*, sedangkan lumpur kering berfungsi sebagai agregat untuk mengurangi kebutuhan campuran pasir. Komposisi campuran ditampilkan pada Tabel 1. Campuran bahan kemudian dimasukkan ke dalam mesin cetak untuk dibentuk menjadi balok berukuran panjang 20 cm. lebar 8 cm, dan tinggi 6 cm.

Tabel 1. Komposisi Bahan *Paving Block*

Variasi	Komposisi		
	Lumpur (%)	Pasir (%)	Semen (%)
1	15	60	25
2	25	50	25
3	35	40	25

### Proses Pengerasan dan Pengujian

*Paving block* yang dihasilkan kemudian direndam selama 7 hari sebagai proses hidrasi awal lalu dikeringkan selama 14 hari di udara terbuka. Proses dilanjutkan dengan pengeringan hingga berusia 28 hari. Selanjutnya dilakukan uji kuat tekan untuk mengetahui durabilitas *paving block* menggunakan

mesin penekan hidrolik. Uji kuat tekan dilakukan berdasarkan metode dalam SNI 03-0691-1996. Sampel *paving block* diberikan variasi pembebanan dengan mesin penekan hingga hancur. Kuat tekan dihitung dengan cara membagi beban tekan dengan luas bidang tekan. Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan standar mutu kekuatan *paving block*.

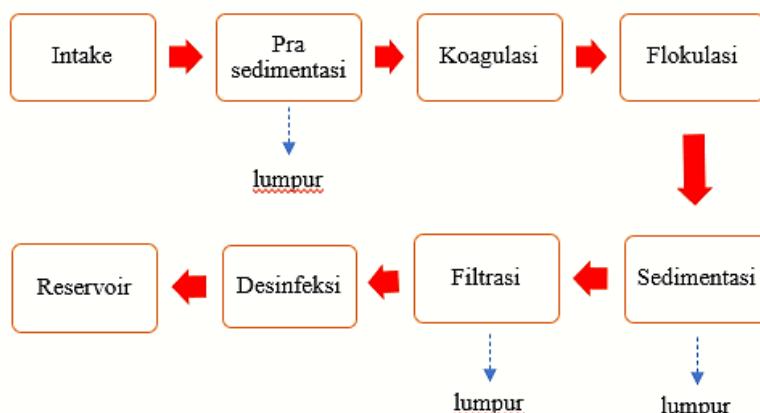
$$\text{Kuat tekan} = \frac{\text{beban tekan (N)}}{\text{luas bidang tekan (mm}^2\text{)}}$$

(Badan Standardisasi Nasional, 1996)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kuantitas Limbah Lumpur

Perumda Tirta Bhagasasi memiliki kapasitas produksi air bersih sebesar 41.000 m<sup>3</sup>/hari. Air baku yang berasal dari sungai Kalimalang melewati tahapan proses pengolahan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Pengolahan diawali dengan proses pra sedimentasi yang bertujuan untuk mengendapkan partikel tersuspensi secara gravitasi. Proses dilanjutkan dengan koagulasi dan flokulasi, dimana terdapat penambahan koagulan alum yang bertujuan untuk membentuk flok dari partikel koloid sehingga mengurangi tingkat kekeruhan air yang diolah. Flok yang sudah terbentuk kemudian diendapkan pada tahapan sedimentasi. Selanjutnya air akan diolah melalui tahapan filtrasi untuk menyisihkan partikel tersuspensi yang masih tersisa. Proses diakhiri dengan desinfeksi menggunakan klorin untuk menghilangkan mikroba patogen.



Gambar 1. Tahapan Pengolahan Air Baku Menjadi Air Bersih

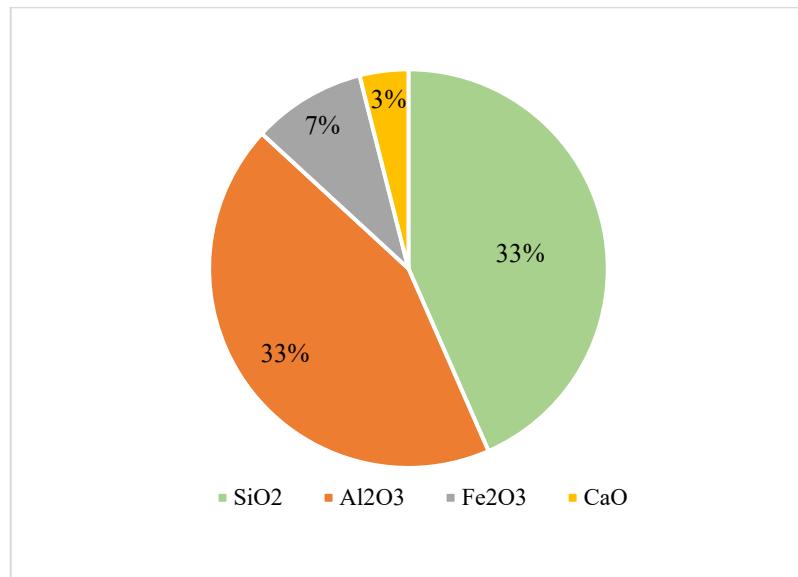
Limbah lumpur basah yang dihasilkan dari pengolahan air baku menjadi air minum di Perumda Tirta Bhagasasi rata-rata sebesar 28.874 m<sup>3</sup> setiap bulannya. Volume limbah lumpur pada 3 bulan pengukuran ditunjukkan pada Tabel 2. Kuantitas lumpur yang dihasilkan tergantung pada debit air baku, kualitas air baku, dosis koagulan, dan kondisi musim hujan atau kemarau (Ahmad et al., 2017).

Tabel 2. Volume Lumpur Basah

Bulan	Jumlah (m <sup>3</sup> / bulan)
Juni	21.131,4
Agustus	32.353,1
September	33.137,75
Rata-rata	28.874,08

### Karakteristik Limbah Lumpur

Lumpur yang dihasilkan dari proses penyediaan air bersih mengandung bahan anorganik (tanah, pasir, dan oksida logam) dan organik yang berasal dari sumber air bakunya (Fiore et al., 2020). Secara umum, lumpur yang dihasilkan dari pengolahan air minum dengan koagulan alum memiliki kandungan terbesar berupa SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Komposisi utama limbah lumpur ditampilkan pada Gambar 2 (Messa et al., 2025). SiO<sub>2</sub> dalam lumpur berasal dari pelapukan batuan dan tanah yang terbawa sepanjang aliran sungai, partikel berada di dalam air sungai sebagai *total suspended solid* (TSS) dan koloid.



Gambar 2. Komposisi Dominan Limbah Lumpur

Hasil pengukuran parameter fisika dan kimia pada limbah lumpur dari Perumda Tirta Bhagasari dijabarkan pada Tabel 3. Karena dihasilkan dari pengendapan partikel tersuspensi, konsentrasi TSS dalam limbah lumpur sangat tinggi. Kandungan air dalam limbah lumpur basah masih tinggi, yaitu di atas 80% sehingga perlu direduksi untuk mengurangi volume limbah dan memudahkan proses penanganannya.

Tabel 3. Hasil Analisis Fisika dan Kimia Limbah Lumpur

Parameter	Hasil Analisis	Unit
<b>Parameter Fisika</b>		
Temperatur	31,4	°C
TDS	172	mg/L
TSS	1781	mg/L
<b>Parameter Kimia</b>		
pH	7,08	mg/L
Fe	<0,25	mg/L
Mn	<0,1	mg/L
Ba	<0,5	mg/L
Cu	<0,02	mg/L
Zn	0,319	mg/L
Cr	<0,05	mg/L
Cd	<0,01	mg/L
Hg	0,0011	mg/L
BOD	118	mg/L
COD	395	mg/L

Kandungan logam berat seperti Cd, Cr, dan Hg berada pada konsentrasi yang sangat rendah, sehingga tidak menimbulkan risiko signifikan terhadap pemanfaatan lumpur sebagai bahan konstruksi non-struktural. Nilai BOD sebesar 118 mg/l menunjukkan kandungan bahan organik yang masih tinggi. Keberadaan bahan organik ini berpotensi mengurangi daya rekat antara semen dan agregat (Sukadarminto et al., 2025).

### Hasil Pembuatan *Paving Block*

Penelitian ini menerapkan salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengolah limbah lumpur, yaitu dimanfaatkan sebagai campuran dalam pembuatan *paving block*. Pada proses pembuatan *paving block*, diketahui bahwa persentase lumpur kering yang lebih tinggi dalam campuran menyebabkan tampilan fisik *paving block* menjadi lebih rapuh. *Paving block* yang dibuat dengan variasi campuran lumpur ditunjukkan pada Gambar 3. Pada penelitian yang memanfaatkan limbah lumpur untuk pembuatan bata, didapatkan hasil yang serupa. Semakin tinggi kadar lumpur dalam campuran maka bata yang terbentuk lebih rapuh dan mudah hancur (Apriani et al., 2023).



Gambar 3. Variasi Komposisi Lumpur Pada *Paving Block*

Untuk dapat memenuhi persyaratan sebagai bahan bangunan, *paving block* harus melewati beberapa pengujian berdasarkan SNI 03-0691-1996 mengenai bata beton (*paving block*). Salah satu pengujian yang dilakukan adalah kuat tekan. Mutu *paving block* dikategorikan ke dalam 4 kelas, berdasarkan kekuatannya untuk menahan beban. Syarat mutu kuat tekan *paving block* dijabarkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Syarat Uji Kuat Tekan *Paving Block*

<b>Mutu</b>	<b>Kuat Tekan (Mpa)</b>		<b>Penggunaan</b>
	Rata-rata	Min.	
<b>A</b>	40	35	Jalan
<b>B</b>	20	17	peralatan parkir
<b>C</b>	15	12,5	pejalan kaki
<b>D</b>	10	8,5	taman dan penggunaan lain

Berdasarkan hasil pengujian diketahui bahwa ketika persentasi limbah lumpur dalam *paving block* meningkat, kemampuan menahan tekanannya menurun. Hasil uji kuat tekan *paving block* campuran lumpur ditunjukkan pada Tabel 5. Dari 3 variasi campuran lumpur, hanya variasi 1 dengan campuran lumpur 15% yang menghasilkan *paving block* mutu D sedangkan variasi lainnya tidak memenuhi syarat.

Tabel 5. Hasil Uji Kuat Tekan

<b>Variasi</b>	<b>Kuat Tekan (Mpa)</b>	<b>Hasil</b>
1	11,9	Memenuhi syarat mutu D
2	7,55	Tidak memenuhi syarat
3	6,04	Tidak memenuhi syarat

Hasil penelitian (Siswoyo et al., 2022) menunjukkan hal yang serupa, campuran lumpur 10% dapat menghasilkan *paving block* mutu D, sedangkan campuran lumpur 30% tidak memenuhi syarat kuat tekan. Penelitian lainnya yang menggunakan limbah lumpur sebagai substansi agregat halus dalam pembuatan *paving block* menunjukkan adanya penurunan kuat tekan ketika komposisi lumpur dalam campuran ditingkatkan. Kadar maksimal lumpur digunakan sebagai pengganti agregat halus yang masih memiliki kuat tekan yang baik adalah 15% (Hemalatha et al., 2024). Hal ini disebabkan kadar lumpur mempengaruhi kemampuan agregat melekat pada semen (Purwanto & Prastiwi, 2012). Ikatan antara semen dan agregat berpengaruh terhadap durabilitas beton (Satriani, 2019). Kandungan komponen organik dalam lumpur dan meningkatnya struktur permeabel menyebabkan berkurangnya daya rekat antara agregat dan semen (Hemalatha et al., 2024). *Paving block* mutu D hanya dapat dipergunakan area yang tidak memerlukan kekuatan untuk menahan beban berat, lebih berfokus pada estetika dan beban

yang ringan, seperti penggunaan untuk halaman dan taman. Syarat mutu paving block yang diuji pada penelitian ini masih terbatas pada kuat tekan, untuk dapat digunakan *paving block* harus memenuhi persyaratan lainnya menurut SNI 03-0691-1996 yaitu ketahanan aus, penyerapan air, dan ketahanan terhadap natrium sulfat.

### Nilai Ekonomi Pemanfaatan Limbah Lumpur

Pemanfaatan limbah lumpur merupakan penerapan prinsip ekonomi sirkuler karena limbah digunakan untuk mengurangi penggunaan bahan baku pasir (Nguyen et al., 2022). Perbandingan biaya pembuatan 1 buah *paving block* secara konvensional dan dengan menggunakan limbah lumpur diuraikan pada Tabel 6. Biaya pembuatan *paving block* dengan memanfaatkan limbah lumpur 5% lebih rendah dibandingkan *paving block* konvensional.

Tabel 6. Perbandingan Biaya Pembuatan *Paving Block*

Deskripsi	Satuan	Harga satuan	Komposisi		Biaya	
			Daur ulang	Konvensional	Daur ulang	Konvensional
<b>Semen</b>	kg	Rp.2.350	0,50	0,50	Rp1.175	Rp1.175
<b>Pasir</b>	kg	Rp. 261	1,20	1,50	Rp. 313,2	Rp. 391,5
<b>Lumpur</b>	kg	-	0,30	-	-	-
<b>Air</b>	liter	Rp. 3	0,23	0,23	Rp.0,69	Rp.0,69
<b>Listrik</b>	kWh	Rp. 1.352	0,0346	0,0346	Rp.46,80	Rp.46,80
		<b>Total</b>			<b>Rp.1.535,7</b>	<b>Rp.1.614</b>

Secara ekonomi, pengurangan biaya ini memberikan dua keuntungan utama. Pertama, penggunaan lumpur sebagai bahan substitusi dapat mengurangi ketergantungan terhadap material pasir yang merupakan sumber daya dengan jumlah yang terbatas. Kedua, pemanfaatan limbah lumpur membantu menekan biaya operasional perusahaan pengolahan air minum terkait penanganan, pengangkutan, dan pembuangan lumpur ke tempat pembuangan akhir (TPA). Selain itu, terdapat manfaat tidak langsung karena mencegah timbulnya biaya penanganan pencemaran ekosistem akuatik akibat pembuangan limbah lumpur ke sungai.

### KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa limbah lumpur dari proses pengolahan air minum memiliki potensi sebagai bahan substitusi agregat halus dalam pembuatan *paving block*, terutama untuk aplikasi dengan beban ringan. Hasil pengujian kuat tekan mengindikasikan bahwa hanya campuran dengan komposisi lumpur 15% yang memenuhi standar mutu D menurut SNI 03-0691-1996, sedangkan peningkatan kadar lumpur hingga 25% dan 35% menyebabkan penurunan kekuatan sehingga produk yang dihasilkan yang tidak memenuhi persyaratan. Pemanfaatan limbah lumpur juga memberikan keuntungan ekonomi dengan mengurangi kebutuhan pasir dan menekan biaya produksi sekitar 5%, serta mendukung prinsip ekonomi sirkuler melalui pengurangan timbulan limbah. Meskipun demikian, kualitas paving block berbahan lumpur masih terbatas pada penggunaan non-struktural, sehingga diperlukan penelitian lanjutan mengenai pengujian mutu yang lebih lengkap, modifikasi bahan, dan peningkatan proses stabilisasi untuk meningkatkan kekuatannya.

### DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2016). Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 950–955. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.088>
- Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2017). Sludge quantification at water treatment plant and its management scenario. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6166-1>
- Apriani, I., Sutrisno, H., & A.S., M. D. (2023). Pemanfaatan Limbah Lumpur PDAM Gunung Poteng Kota Singkawang Sebagai Bahan Pengganti Tanah Liat Pada Pembuatan Batu Bata. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(1), 22–28. <https://doi.org/10.14710/jil.21.1.22-28>
- Badan Standardisasi Nasional. (1996). SNI 03-0691-1996 Bata beton (*Paving block*).

- Bensitel, N., Haboubi, K., Azar, F., Hammoudani, Y. El, Abdouni, A. El, Haboubi, C., Dimane, F., & Kasmi, A. El. (2023). Potential reuse of sludge from a potable water treatment plant in Al Hoceima city in northern Morocco. *Water Cycle*, 4(July), 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.07.002>
- Dahhou, M., El, M., Muhammad, M., & Arshad, A. (2018). Synthesis and characterization of drinking water treatment plant sludge - incorporated Portland cement. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 891–901. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10163-017-0650-0>
- Fiore, F. A., Rodgheer, S., Ito, C. Y. K., Bardini, V. S. dos S., & Klinsky, L. M. G. (2020). Quality of surface water and generation of sludge at water treatment plants. *Revista Ambiente e Água*. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Hemalatha, B., Shyamala, G., Babu, M. D., & Pramila, V. (2024). Technical Feasibility of Water Treatment Plant Sludge with Nano Silica as Concrete Paver Block. *Nano World Journal*, 10(1), 301–306. <https://doi.org/https://doi.org/10.17756/nwj.2024-s1-054>
- Messa, G. N., Maria, A., Jesus, D. De, & Fiore, F. A. (2025). Resources , Conservation & Recycling Advances Beneficial use of sludge from water treatment plants as a multiple resource : Potential and limitations. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 25(January). <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200247>
- Nguyen, M. D., Thomas, M., Surapaneni, A., Moon, E. M., & Milne, N. A. (2022). Environmental Technology & Innovation Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102651. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102651>
- Purwanto, & Prastiwi, Y. A. (2012). Pengaruh Kadar Lumpur Pada Agregat Halus Dalam Mutu Beton. *Teknik*, 33(2), 46–52.
- Qrenawi, L. I., & Rabah, F. K. J. (2021). Sludge management in water treatment plants : literature review Sludge management in water treatment plants : literature review. *International Journal of Environment and Waste Management*, 27(1), 93–124. <https://doi.org/10.1504/IJEWM.2021.111909>
- Satriani. (2019). Pengaruh Kadar Lumpur Terhadap Kuat Tekan Beton Normal. *Prosiding Seminar Nasional Riset Terapan*, 53–57.
- Siswoyo, E., Prayitno, A. H., & Rahma, N. S. (2022). Paving Block Ramah Lingkungan Berbasis Lumpur Dari Instalasi Pengolahan Air Minum. *Jurnal Permukiman*, 17(1), 9–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.31815/jp.2022.17.9-15>
- Sukadarminto, Anisarida, A. A., & Janizar, S. (2025). Pengaruh Kebersihan Agregat terhadap Kuat Tekan Beton dan Implikasinya pada Konstruksi Struktural Sederhana. *Jurnal Teknik Sipil Cendekia*, 6(2), 409–421. <https://doi.org/10.51988/jtsc.v6i2.350>
- Turner, T., Wheeler, R., Stone, A., & Oliver, I. (2019). Potential Alternative Reuse Pathways for Water Treatment Residuals: Remaining Barriers and Questions — a Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11270-019-4272-0>

*Sophia Shanti Meilani, Rayhan Alfatah, Wahyu Kartika*

Submitted: **20/10/2025**; Revised: **21/11/2025**; Accepted: **20/12/2025**; Published: **31/01/2026**