



## SISTEM LAHAN BASAH BUATAN TERINTEGRASI TENAGA MIKROHIDRO UNTUK PENGOLAHAN AIR LIMBAH KAMPUNG BATIK PASUNDAN

Deviany Deviany<sup>1\*</sup>, Reggina Aulia Yusuf<sup>1</sup>, Yonathan Marasi Tambunan<sup>1</sup>, Desi Riana Saputri<sup>1</sup>, Dennis Farina Nury<sup>2</sup>, Nina Juliana Roberta Turnip<sup>1</sup>, Calaelma Logys Imalia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, 35365, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknologi Proses Industri Petrokimia, Politeknik Industri Petrokimia Banten, Serang, 42166, Indonesia

\*Email: [deviany@tk.itera.ac.id](mailto:deviany@tk.itera.ac.id)

### Abstrak

Teknik pewarnaan kain tradisional batik telah diakui oleh UNESCO sebagai warisan kemanusiaan untuk budaya lisan dan nonbendawi. Industri batik di Indonesia didominasi oleh usaha kecil dan menengah yang belum memiliki fasilitas instalasi pengolahan air limbah (IPAL) memadai, seperti halnya di Kampung Batik Pasundan. Air limbah industri batik mengandung bahan kimia berbahaya, pewarna, dan logam berat yang dapat menimbulkan masalah lingkungan dan kesehatan. Pada studi kasus ini, lahan basah buatan dirancang melibatkan interaksi antara tanaman dan mikroorganisme untuk pengolahan air limbah. Sistem pembangkit listrik tenaga mikrohidro, yang terhubung ke lahan basah buatan, memanfaatkan aliran air untuk menghasilkan listrik dan menyediakan pasokan energi untuk proses produksi batik. Kapasitas air limbah sebesar 12.000 L/hari memungkinkan untuk menggerakkan turbin menghasilkan 1.368,75 kWh listrik per tahun, sekitar 14% dari total kebutuhan listrik Kampung Batik Pasundan. Desain sistem ini menawarkan solusi pengolahan air limbah industri batik yang berkelanjutan dengan integrasi konservasi energi.

**Kata Kunci:** Lahan basah buatan; Limbah cair batik; Tenaga mikrohidro

### Abstract

*UNESCO has recognised the traditional fabric dyeing technique of batik as a Heritage of Humanity for Oral and Intangible Culture. The batik industry in Indonesia is dominated by small and medium-sized enterprises that do not have adequate wastewater treatment plant (WWTP) facilities, as in Kampung Batik Pasundan. Batik industry wastewater contains hazardous chemicals, dyes, and heavy metals that can cause environmental and health problems. In this case study, an artificial wetland was designed involving the interaction between plants and microorganisms for wastewater treatment. The micro-hydro power generation system, which is connected to the artificial wetland, utilises the water flow to generate electricity and provide an energy supply for the batik production process. The wastewater capacity of 12,000 L/day makes it possible to drive the turbine to generate 1,368.75 kWh of electricity per year, about 14% of the total electricity demand of Kampung Batik Pasundan. This system design offers a sustainable batik industry wastewater treatment solution with energy conservation integration.*

**Keywords:** Batik wastewater; Constructed wetland; Micro-hydropower

### 1. PENDAHULUAN

Batik merupakan seni tekstil Indonesia, khususnya daerah Jawa dan telah diakui sebagai warisan budaya dunia oleh *United Nations Educational, Scientific, and*

*Cultural Organization* (UNESCO) sejak 2009. Sempat terpuruk di masa krisis moneter tahun 1997, industri batik kini perlahan bangkit dan mengalami perkembangan cukup pesat (Haerulloh et al., 2021).

Berdasarkan data Balai Besar Kerajinan dan Batik (BBKB) Kementerian Perindustrian, telah ada sekitar 3.159 unit usaha batik yang tercatat di seluruh Indonesia dan menjadi tulang punggung perekonomian bagi masyarakat di beberapa daerah (Ahdiat, 2022). Meskipun demikian, industri batik di Indonesia masih didominasi oleh industri skala mikro hingga menengah dengan fasilitas yang terbatas, terutama kurangnya sistem instalasi pengolahan air limbah (IPAL) yang memadai (Febriyanti & Winanti, 2020). Limbah cair merupakan limbah terbanyak yang dihasilkan dari keseluruhan proses produksi, yaitu sekitar 80% dari total jumlah air yang digunakan (Meilanda et al., 2021). Jika tidak dikelola dengan tepat, limbah ini dapat mencemari lingkungan, terutama lingkungan akuatik. Limbah ini dapat menyebabkan peningkatan kebutuhan oksigen kimiawi dan biologis (*chemical oxygen demand/COD* dan *biological oxygen demand/BOD*), akumulasi toksin pada sisik ikan, serta terhalangnya penetrasi sinar matahari ke dalam air sungai sehingga mengganggu ekosistem bawah air.

Komposisi limbah batik yang kompleks berasal dari komponen kimiawi sukar terdegradasi, termasuk sisa zat warna sintesis seperti naptol dan indigosol. Selain itu, limbah ini cenderung memiliki pH yang tinggi karena penggunaan basa dalam proses produksi, serta terindikasi mengandung logam berat seperti krom (Cr), timbal (Pb), dan nikel (Ni) (Apriyani, 2018). Tabel 1 merangkum karakteristik umum limbah batik dan domestik dibandingkan dengan standar baku mutu air limbah kelas IV menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. P.16/2019.

**Tabel 1.** Karakteristik dan baku mutu air limbah batik

Parameter	Limbah Batik	Limbah Domestik	Baku Mutu
pH	7,65–12,5	N/A	6-9
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	340	166,47	150
COD (mg/L)	1600–4090	343,94	60
TSS (mg/L)	305	111	50

Sumber: Zakaria et al. (2023); Natsir et al. (2021); Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia (2019)

Dengan komposisi limbah yang kompleks tersebut, selama ini penanganan limbah di sebagian besar rumah-rumah produsen batik hanya terbatas pada pengendapan pada bak-bak penampung, lalu dibiarkan meresap ke tanah tanpa pengolahan lanjutan atau langsung dibuang ke badan air terdekat (Yuliana, 2021).

Seperti halnya di Kampung Batik Pasundan, salah satu area produksi batik di Bandung, Jawa Barat yang memproduksi sekitar 1.000 L limbah cair per hari yang menjadi lokasi studi kasus karya ini. Proses pembuatan batik di Kampung Batik Pasundan menggunakan pewarna sintesis berupa naptol dan indigosol, yang menjadi pencemar utama pada air limbah. Kampung batik yang terdiri dari 10 rumah produksi ini tidak

memiliki saluran air atau selokan dan IPAL yang memadai, sehingga air limbah hanya ditampung dan diendapkan pada bak penampungan lalu dipompa melalui pompa filter untuk digunakan kembali sebagai air untuk proses produksi. Namun pengolahan dengan cara seperti itu tidak sepenuhnya mengurangi bahan kimia berbahaya dan kontaminan dari air limbah, sehingga dapat berpengaruh pada kualitas produk batik.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengolah limbah cair industri batik, salah satunya metode bioremediasi dengan sistem lahan basah buatan atau *constructed wetland* (CW) (Apriyani, 2018). Sistem ini merupakan teknologi pengolahan limbah yang efektif dan ramah lingkungan, serta cocok diterapkan di kawasan padat penduduk seperti Kampung Batik Pasundan. Selain sebagai media pengolahan limbah cair dengan efisiensi pengurangan COD dan komponen organik lebih dari 90%, sistem juga dapat berfungsi sebagai ruang terbuka hijau dan area resapan air.

Untuk meningkatkan efektifitas lahan basah buatan dalam mengolah limbah cair batik, teknologi ini dapat dikombinasikan dengan sistem pengolahan *sand-filter* sebelum masuk ke area lahan basah. *Sand-filter* yang terdiri dari 3 lapisan dari atas ke bawah berupa pasir, kerikil, dan karbon aktif mampu mengurangi beban limbah yang akan diolah dalam CW. Lapisan kerikil dan pasir berperan dalam mereduksi kandungan *total suspended solid* (TSS). Dilanjutkan proses adsorpsi dengan karbon aktif untuk menyerap zat warna sintesis berupa naptol dan indigosol yang mengandung logam berat berupa Zn, Cr, dan Cu.

Masifnya air limbah yang dihasilkan dari produksi batik, ditambah air limbah domestik yang dihasilkan masing-masing rumah dapat dimanfaatkan sebagai tenaga untuk memutar turbin pada sistem pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Tenaga mikrohidro merupakan sistem pembangkit energi listrik tenaga air yang digunakan untuk menyuplai kebutuhan listrik pada skala rumah tangga atau desa kecil yang berkisar 5kW hingga 100kW (Anaza et al., 2017). Aliran air dimanfaatkan untuk menghasilkan energi kinetik yang akan dikonversi menjadi energi listrik. Dalam produksi batik, listrik diperlukan pada proses pencelupan dan pewarnaan, pengeringan, *finishing* menggunakan setrika, dan juga untuk penerangan masing-masing rumah.

Dalam karya ini diusulkan integrasi sistem *sand-filter*, lahan basah buatan, dan pembangkit listrik tenaga mikrohidro sebagai solusi komprehensif untuk pengolahan limbah dan suplai energi di industri batik skala mikro, sebuah pendekatan yang belum banyak dikaji sebelumnya di Indonesia.

Penggunaan sistem ini dapat berkontribusi signifikan terhadap pencapaian *sustainable development goals* (SDGs), di antaranya dalam penyediaan air bersih dan sanitasi, energi bersih dan terjangkau, konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab, serta membantu meningkatkan keberlanjutan ekosistem air dan daratan. Diharapkan sistem ini dapat menjadi model pengolahan limbah terintegrasi

berbasis masyarakat yang dapat direplikasi pada sentra industri batik lainnya di Indonesia, sekaligus menjadi kampung batik percontohan yang berwawasan lingkungan.

## 2. BAHAN DAN METODE

### 2.1 Bahan Rancangan

Perancangan sistem IPAL dalam desain ini membutuhkan bahan berupa: bak penampung limbah; drum sebagai tempat untuk *sand-filter*; pasir, kerikil, karbon aktif sebagai isian *sand-filter*; pipa; tanaman *reeds* dan *irish*, dan komponen pembangkit listrik mikrohidro.

### 2.2 Metode Perancangan Sistem

Metode perancangan sistem dilakukan dengan pendekatan *general review* terhadap berbagai sumber literatur ilmiah yang relevan. Pendekatan ini digunakan untuk menyusun konfigurasi dan dimensi sistem yang sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik lingkungan Kampung Batik Pasundan.

Perancangan sistem diawali dengan pengumpulan limbah cair dari proses produksi dan aktivitas domestik rumah tangga. Limbah ini dialirkan melalui saluran buatan menuju dua buah bak penampungan berkapasitas masing-masing 20.000 L yang berfungsi sebagai unit pengendapan awal. Setelah melalui proses pengendapan, air limbah dialirkan menuju enam unit *sand-filter* yang terdiri dari tiga lapisan media: pasir, kerikil, dan karbon aktif. Media pasir dan kerikil berfungsi untuk mereduksi kandungan *total suspended solids* (TSS), sementara karbon aktif digunakan untuk mengadsorpsi zat warna sintesis dan logam berat seperti Cr, Cu, dan Zn.

Air hasil olahan *sand-filter* kemudian dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin dalam sistem mikrohidro. Aliran air diarahkan melalui pipa ke titik elevasi lebih rendah untuk menciptakan ketinggian jatuhnya air (*head*). Energi listrik yang dihasilkan diharapkan mampu menyuplai sebagian kebutuhan listrik untuk produksi batik dan keperluan rumah tangga warga.

Setelah melewati sistem mikrohidro, air limbah dialirkan menuju lahan basah buatan tipe *horizontal subsurface flow* (HSSF). Sistem ini dirancang untuk mengolah air limbah lebih lanjut secara biologis melalui interaksi antara media berpori, akar tanaman, dan mikroorganisme. Pemilihan tipe HSSF didasarkan pada efektivitasnya dalam menangani limbah dengan beban organik dan logam berat yang tinggi, serta efisiensinya dalam penggunaan lahan di lingkungan padat penduduk. Estimasi luas lahan basah ditentukan menggunakan metode reed berdasarkan parameter BOD.

### 2.3 Perhitungan Teknikal

#### 2.3.1 Dimensi *sand-filter*

Dalam penentuan dimensi *sand-filter*, digunakan hubungan dasar antara volume, luas penampang, dan tinggi, melalui Persamaan (1).

$$V = A \cdot h = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h \quad (1)$$

dengan V adalah volume air (m<sup>3</sup>); A adalah luas penampang silinder (m<sup>2</sup>); d adalah diameter tabung (m); h adalah tinggi kolom air dalam *sand-filter* (m).

Konfigurasi lapisan media filter mengacu pada literatur sebelumnya yang menunjukkan efektivitas tinggi dalam mengurangi TSS dan zat warna dari limbah batik. Pemilihan ketebalan tiap media dan *head space* ditentukan berdasarkan efisiensi pengolahan dan aspek operasional praktis, yang akan dibahas lebih lanjut pada sub bab hasil dan pembahasan.

#### 2.3.2 Luas area lahan basah buatan

Perkiraan luas area didekati dengan metode reed yang menggunakan acuan parameter BOD (Soeprijanto & Karnaningroem, 2008), yang dituliskan dalam Persamaan (2).

$$A_s = L \cdot W = \left(\frac{Q}{t}\right) (y \cdot n) = \frac{\left\{Q \cdot \ln\left(\frac{C_i}{C_o}\right)\right\}}{(K^T \cdot y \cdot n)} \quad (2)$$

dengan A<sub>s</sub> adalah luas area lahan basah buatan (CW); L adalah panjang CW; W adalah lebar CW; Q adalah debit air masuk area CW; t adalah waktu tinggal di dalam CW; C<sub>0</sub> adalah konsentrasi BOD pada aliran keluar (mg/L); C<sub>i</sub> adalah konsentrasi BOD pada aliran masuk (mg/L); K<sup>T</sup> adalah konstanta pada temperatur di dalam CW per hari (°C); y adalah kedalaman CW; dan n adalah porositas (%).

Nilai konstanta temperatur K<sup>T</sup> dapat dihitung menggunakan persamaan Persamaan (3).

$$K^T = K_{20} (1,06^{(T-20)}) \quad (3)$$

dengan nilai K<sub>20</sub> atau konstanta pada temperatur 20°C diketahui sebesar 1,104 dan diasumsikan temperatur di permukaan CW sebesar 32°C sehingga menghasilkan nilai K<sup>T</sup> senilai 2,22 per hari.

Waktu tinggal di dalam CW didekati melalui persamaan matematis turunan dari Persamaan (1), sehingga menjadi Persamaan (4).

$$t = HRT = \frac{nLWD}{Q} \quad (4)$$

Dengan t atau HRT (*hydraulic retention time*) adalah waktu tinggal air limbah di dalam CW; n adalah porositas (%); L adalah panjang CW; W adalah lebar CW; D adalah kedalaman CW; dan Q adalah debit air masuk area CW.

#### 2.3.3 Perhitungan debit dan aliran

Kecepatan aliran air keluar dari *sand-filter* yang dimanfaatkan sebagai sumber energi mikrohidro, diperkirakan berdasarkan hukum Torricelli, pada Persamaan (5).

$$v = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

dengan v adalah kecepatan aliran (m/s), g sebagai percepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>), dan h merupakan ketinggian air dalam *sand-filter* yaitu 1,28 m.

Debit aliran kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan kontinuitas aliran fluida, pada Persamaan (6).

$$Q = A \cdot V = \frac{1}{4} \pi d^2 \cdot v \quad (6)$$

dengan  $Q$  adalah debit aliran ( $m^3/s$ ),  $A$  adalah luas penampang lubang ( $m^2$ ),  $d$  merupakan diameter lubang ( $m$ ), dan  $v$  sebagai kecepatan aliran ( $m/s$ ).

2.3.4 *Estimasi energi listrik mikrohidro*

Setelah itu, dilakukan perhitungan jumlah energi yang dapat tergenerasi dari sistem pembangkit listrik tenaga mikrohidro, yang diperkirakan menggunakan Persamaan (7).

$$E = \rho \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta \cdot t \tag{7}$$

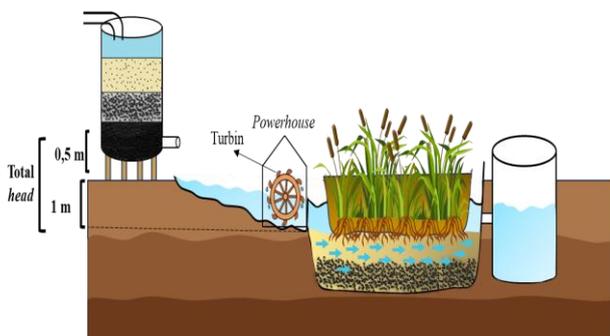
Dengan  $E$  adalah energi yang tergenerasi pertahun (kWh),  $\rho$  adalah massa jenis air ( $1000 \text{ kg}/m^3$ ),  $H_n$  sebagai *head* (m),  $\eta$  adalah efisiensi turbin (%), dan  $t$  adalah jumlah waktu (jam) dalam satu tahun.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 **Gambaran Umum Sistem IPAL Terintegrasi**

Sistem IPAL yang dirancang pada studi ini merupakan sistem pengolahan air limbah terintegrasi yang dikembangkan untuk menjawab permasalahan pencemaran air dan potensi energi terbarukan di kawasan produksi batik skala mikro, Kampung Batik Pasundan. Sistem terdiri dari empat komponen utama, yaitu bak penampung, *sand-filter*, pembangkit listrik mikrohidro, dan lahan basah buatan (*constructed wetland*), yang dirancang berkesinambungan dari hulu ke hilir.

Limbah cair yang berasal dari aktivitas produksi batik dan rumah tangga dikumpulkan dalam bak penampungan untuk proses pre-sedimentasi. Selanjutnya, air limbah dialirkan menuju *sand-filter* berlapis pasir, kerikil, dan karbon aktif untuk mereduksi partikel tersuspensi (TSS), zat warna sintetis, dan logam berat. Air hasil *sand-filter* kemudian dialirkan melalui sistem mikrohidro untuk memanfaatkan tekanan air sebagai sumber energi pembangkit listrik skala kecil. Setelah melewati turbin, air selanjutnya masuk ke sistem lahan basah buatan tipe *horizontal subsurface flow* (HSSF) untuk diolah lebih lanjut secara biologis oleh tanaman dan mikroorganisme. Skema sistem ini ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema sistem IPAL dan tenaga mikrohidro

Sistem IPAL terintegrasi ini dirancang tidak hanya untuk mencapai baku mutu air limbah kelas IV, tetapi juga untuk menghasilkan energi bersih dan mendukung upaya efisiensi lahan dan sumberdaya di kawasan padat penduduk seperti Kampung Batik

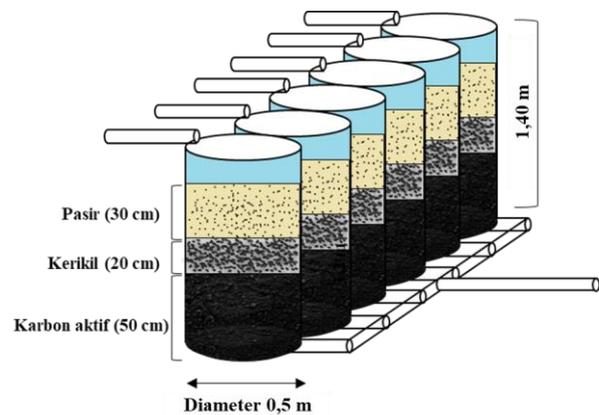
Pasundan. Air hasil olahan sistem ini diharapkan dapat digunakan kembali dalam kegiatan penyiraman tanaman, penghijauan, dan sanitasi non-konsumsi.

3.2 **Desain Unit Pengolahan**

3.2.1 *Rancangan sand-filter*

Air limbah yang berasal dari sepuluh rumah di Kampung Batik Pasundan terdiri atas limbah produksi batik dan limbah domestik. Dengan asumsi satu rumah dihuni oleh 5-6 orang dan setiap individu menghasilkan sekitar 200 L limbah domestik per hari, maka total limbah domestik yang dihasilkan mencapai sekitar 11.000 L per hari. Ditambah dengan 1.000 L limbah batik dari aktivitas produksi, total air limbah yang perlu diolah mencapai 12.000 L per hari.

Untuk mengolah volume tersebut, dirancang enam unit *sand-filter* yang disusun secara paralel. Masing-masing unit memiliki kapasitas pengolahan 2.000 L per hari, dengan delapan siklus pengolahan (*batch*) per hari. Setiap siklus mengolah sekitar 250 L air dengan waktu tinggal (*hydraulic retention time*) selama 3 jam. Berdasarkan volume tersebut, dimensi *sand-filter* berbentuk tabung silinder dengan diameter 0,5 meter dan tinggi efektif sekitar 1,4 meter (termasuk ruang kosong di atas media), yang dihitung berdasarkan Persamaan (1). Setiap tabung diisi dengan tiga lapisan media filter, yaitu kerikil (20 cm), pasir (30 cm), dan karbon aktif (50 cm). Lapisan kerikil dan pasir berfungsi sebagai penyaring fisik untuk menurunkan TSS, sedangkan karbon aktif dimanfaatkan untuk proses adsorpsi zat warna sintetis seperti naptol dan indigosol serta logam berat yang terkandung di dalamnya (Cr, Cu, Zn).



Gambar 2. Skema *sand-filter*

Merujuk pada studi Kurniawati & Sanuddin, (2020), konfigurasi *sand-filter* seperti ini dapat menurunkan TSS hingga 91,6%. Sementara itu, penggunaan karbon aktif dengan ketebalan 50 cm menunjukkan efektivitas adsorpsi warna hingga 98% berdasarkan studi oleh Pratiwi et al. (2019).

Karakteristik air limbah batik yang digunakan dalam perancangan ini mengacu pada data kompilasi dari *review* artikel oleh Zakaria et al. (2023), pada Tabel 1, yang merangkum konsentrasi parameter limbah dari berbagai studi terdahulu. Nilai-nilai ini digunakan sebagai dasar input rancangan sistem, karena

merepresentasikan kondisi umum limbah batik skala kecil di Indonesia. Tabel 2 menyajikan perbandingan kualitas air limbah batik sebelum dan sesudah pengolahan berdasarkan studi terdahulu yang menggunakan pendekatan *sand-filter* dan/atau *constructed wetland*.

**Tabel 2.** Perbandingan kualitas air hasil pengolahan limbah batik berdasarkan studi terdahulu

Referensi	Metode	Parameter	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)
Kurniawati & Sanuddin, 2020	<i>Sand-filter</i>	TSS	3.740	188
		COD	19.294,3	305,7
Firmansyah & Rahmadyanti, 2019	<i>Biofilter</i> dan CW	TSS	3.180	58
		COD	12.000	3.280
García-Ávila, 2020	CW VSSF + <i>Phragmites Australis</i>	TSS	55	22
		BOD <sub>5</sub> COD	102,5 205,04	49,9 78,04
Bianchi et al., 2021	CW HSSF + <i>Phragmites Australis</i>	Zn	0,55	0,11

Jika dibandingkan dengan studi-studi pada Tabel 2, karakteristik limbah yang digunakan dalam desain ini termasuk dalam kategori sedang hingga rendah untuk parameter COD dan TSS. Hal ini menunjukkan bahwa sistem yang dirancang dalam studi ini secara teoritis memiliki potensi keberhasilan tinggi dalam menurunkan beban pencemar hingga memenuhi baku mutu.

Oleh karena itu, efektivitas media filter dalam desain ini dinilai masih relevan dan representatif untuk limbah batik skala kecil. Untuk pengembangan lebih lanjut, pengujian langsung di lapangan akan dibutuhkan guna menyesuaikan desain dengan kondisi aktual air limbah setempat.

Sistem *sand-filter* ini dioperasikan secara *batch* untuk memastikan waktu tinggal yang optimal dan menyediakan debit air yang dapat digunakan dalam sistem mikrohidro. Aliran bersifat periodik (intermiten), bukan kontinu, namun tetap memungkinkan untuk pembangkitan energi skala kecil. Untuk mengantisipasi fluktuasi suplai air akibat berkurangnya produksi batik, sistem ini tetap mempertahankan fungsi utama *sand-filter* sebagai unit *pretreatment* sebelum air dialirkan ke lahan basah buatan. Dalam kondisi debit rendah, fungsi pembangkitan listrik dapat menurun, namun pengolahan air tetap berlangsung melalui lahan basah buatan.

### 3.2.2 Rancangan pembangkit listrik mikrohidro

Air hasil pengolahan dari *sand-filter* dimanfaatkan terlebih dahulu untuk menggerakkan turbin mikrohidro sebelum dialirkan ke sistem lahan basah buatan. Pendekatan ini memungkinkan sistem IPAL berfungsi ganda, tidak hanya mengolah limbah cair, tetapi juga menghasilkan energi bersih yang dapat dimanfaatkan kembali di lingkungan Kampung Batik Pasundan.

Debit air dari masing-masing *sand-filter* dihitung berdasarkan dimensi *outlet* dan ketinggian air dalam tabung, dengan asumsi diameter lubang sebesar 2 cm dan tinggi air 1,28 meter. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan hukum Toricelli dan persamaan kontinuitas (sub bab 2.3.3), kecepatan aliran adalah 4,99 m/s dan menghasilkan debit sebesar  $1,56 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  per unit. Karena sistem *sand-filter* dirancang bekerja secara *batch*, air akan keluar dalam waktu sekitar 2,67 menit per siklus. Dengan enam unit yang beroperasi secara bergantian, durasi operasional turbin diperkirakan mencapai 129 jam per tahun.

Sistem pembangkit tenaga mikrohidro ini dirancang dengan *head* setinggi 1,5 meter dan efisiensi turbin sebesar 75%. Dengan parameter tersebut, energi listrik yang dapat dihasilkan dari sistem mencapai 1.368,75 kWh per tahun. Angka ini setara dengan sekitar 14% dari total konsumsi listrik di Kampung Batik Pasundan, yang berkisar pada 9.638 kWh per tahun. Listrik didistribusikan secara lokal melalui sistem *off-grid microgrid* yang terhubung langsung ke beberapa titik konsumsi di lingkungan Kampung Batik Pasundan.

Jika dibandingkan dengan studi mikrohidro lain yang menggunakan sumber daya aliran sungai atau bendungan dengan *head* tinggi dan debit lebih tinggi, seperti penelitian Dimiyati (2020) yang menghasilkan daya listrik  $1 \times 20 \text{ kW}$ , maka capaian energi listrik yang dihasilkan dari desain ini relatif lebih kecil secara kapasitas. Namun, hal ini masih tergolong efisien dan layak dalam konteks sistem limbah skala kecil dengan sumber air terbatas dan *head* yang rendah.

Energi listrik yang dihasilkan ditujukan untuk menyuplai sebagian kebutuhan operasional rumah produksi batik, seperti pencelupan dan pengeringan, serta kebutuhan penerangan di fasilitas publik seperti saung, galeri batik, dan taman komunitas. Meskipun kapasitas pembangkitan listrik ini tergolong kecil, pendekatan ini mencerminkan integrasi antara pengelolaan limbah dan transisi energi terbarukan dalam skala komunitas.

Desain ini juga mempertimbangkan kemungkinan fluktuasi volume limbah akibat perubahan kapasitas produksi. Dalam kondisi penurunan debit, fungsi utama sistem tetap berfokus pada pengolahan air limbah melalui lahan basah buatan, sedangkan produksi energi bersifat tambahan (*by-product*) yang dapat disesuaikan dengan fleksibilitas operasional.

### 3.2.3 Rancangan lahan basah buatan

Sistem lahan basah buatan (*constructed wetland*, CW) merupakan sistem pengolahan limbah berbasis alam yang efektif dan berbiaya rendah untuk pengolahan air limbah, khususnya di wilayah padat penduduk yang tidak terlayani sistem IPAL terpusat. Sistem pengolahan air limbah dalam lahan basah buatan ini bekerja melalui interaksi antara air limbah, media berpori (seperti kerikil), akar tanaman, dan mikroorganisme untuk menurunkan beban pencemar seperti BOD, COD, TSS, serta logam berat.

Berdasarkan klasifikasi alirannya, lahan basah buatan terbagi menjadi tipe *free water surface* (FWS)

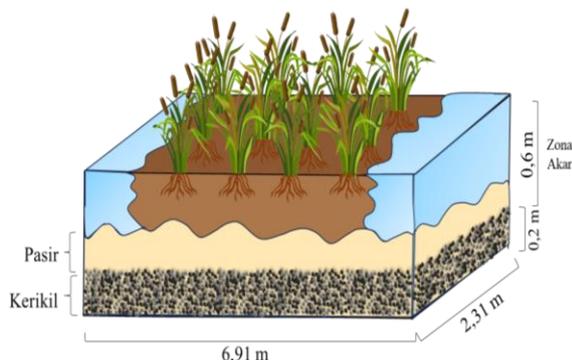
dan *subsurface flow* (SSF). Pada kawasan dengan lahan luas, FWS lebih cocok digunakan karena air mengalir di atas permukaan dan dapat difungsikan sebagai area terbuka hijau atau rekreasi. Namun, untuk limbah industri dengan beban organik dan logam berat yang tinggi, seperti limbah batik, sistem SSF, khususnya tipe aliran horizontal (*horizontal subsurface flow/HSSF*), lebih unggul dari segi efektivitas penguraian kandungan pencemar dalam air limbah.

Keunggulan sistem HSSF telah didukung oleh sejumlah studi terdahulu. Febriyanti & Winanti (2020) melaporkan bahwa sistem HSSF CW efisien menurunkan TSS dan COD dalam limbah batik masing-masing sebesar 98,1% dan 89,3%. Sementara Suswati & Wibisono (2013) mencatat efektivitas pengurangan BOD<sub>5</sub> sebesar 99,7% dan TSS sebesar 97% dalam limbah domestik menggunakan sistem serupa. Efektivitas ini menunjukkan bahwa penggunaan HSSF merupakan pendekatan yang relevan dan terbukti untuk mengolah air limbah batik yang mengandung beban organik dalam konsentrasi rendah hingga sedang, sebagaimana karakteristik limbah yang digunakan pada desain studi ini.

Pada sistem HSSF, air limbah mengalir secara horizontal melalui media berpori dan berinteraksi dengan akar tanaman. Proses ini memungkinkan terjadinya adsorpsi, dekomposisi biologis, dan penyerapan oleh tanaman, sehingga kandungan zat organik dan logam berat dapat direduksi secara signifikan. Selain itu, sistem ini tidak menghasilkan genangan di permukaan dan lebih fleksibel dalam penempatannya di area terbatas, seperti Kampung Batik Pasundan.

Dengan pertimbangan efektivitas, efisiensi lahan, dan kondisi padat penduduk di Kampung Batik Pasundan, maka sistem HSSF dipilih dalam desain ini. Berdasarkan data Google Earth, tersedia dua lahan kosong, masing-masing seluas 101 m<sup>2</sup> dan 62 m<sup>2</sup> yang dapat dimanfaatkan untuk pembangunan *sand-filter*, lahan basah buatan, dan ruang terbuka komunitas.

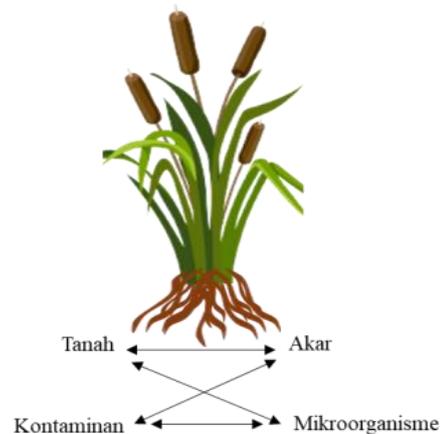
Perhitungan luas area lahan basah buatan mengacu pada metode Reed (sub bab 2.3.2), dengan target penurunan konsentrasi BOD dari 254,915 mg/L menjadi 150 mg/L sesuai baku mutu air limbah kelas IV. Hasilnya, diperoleh kebutuhan luas lahan basah buatan sebesar 15,9 m<sup>2</sup> dengan rasio panjang dan lebar 3:1, yaitu sekitar 6,91×2,31 meter, seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema lahan basah buatan

Sistem ini dirancang menggunakan tanaman *Phragmites australis* (*common reed*), yang telah terbukti memiliki toleransi tinggi terhadap lingkungan dengan kandungan logam berat dan efisien dalam mereduksi BOD, COD, serta nutrisi. Penelitian oleh García-Ávila (2020) menunjukkan bahwa *Phragmites australis* mampu menurunkan BOD hingga 75,39%, COD sebesar 64,78%, dan TSS sebesar 62,85% dalam sistem SSF skala pilot. Sementara itu, studi oleh Bianchi et al. (2021) menunjukkan bahwa *Phragmites australis* mampu menyerap dan menurunkan konsentrasi logam berat dalam air limbah, seperti Zn, Cu, Fe sebesar 60 hingga 90%. Oleh karena itu, tanaman ini dipilih untuk mengolah air limbah batik yang mengandung logam berat dalam konsentrasi rendah hingga sedang pada desain ini. Selain itu, tanaman ini merupakan tumbuhan perenial yang dapat hidup dan berfungsi efektif dalam sistem *constructed wetland* selama beberapa tahun, dengan kemampuan regenerasi dari rimpang yang memungkinkan siklus hidupnya berulang terus menerus.

Mekanisme kerja CW ditunjukkan pada Gambar 4, di mana air limbah akan mengalami proses penyerapan, filtrasi, dan degradasi biologis oleh mikroorganisme serta akar tanaman. Air hasil olahan kemudian ditampung dan didistribusikan kembali untuk kebutuhan non-konsumsi seperti air proses produksi batik, penyiraman tanaman, dan sanitasi lingkungan.



Gambar 4. Mekanisme kerja lahan basah buatan

Dalam implementasi di lapangan, keberhasilan sistem seperti ini sangat bergantung pada partisipasi dan penerimaan masyarakat setempat. Meskipun desain ini belum secara resmi diajukan kepada penduduk Kampung Batik Pasundan, pendekatan *community-based design* menjadi prinsip utama dalam pengembangannya. Keterlibatan warga, khususnya pelaku usaha batik, direncanakan melalui diskusi kelompok terfokus (*focus group discussions*) agar desain sistem sesuai dengan kebutuhan lokal dan tidak mengganggu aktivitas sosial maupun ekonomi yang ada. Pemanfaatan lahan kosong yang tidak produktif juga diharapkan mempermudah penerimaan masyarakat terhadap pembangunan fasilitas ini.

### 3.3 Potensi Pemanfaatan Lahan

Berdasarkan observasi melalui citra Google Earth, seperti pada Gambar 5, Kampung Batik Pasundan memiliki dua area kosong yang dapat dimanfaatkan untuk implementasi sistem IPAL terintegrasi. Lahan terbesar memiliki luas sekitar 101 m<sup>2</sup> dan direncanakan sebagai lokasi utama sistem pengolahan limbah dan pembangkit mikrohidro. Area ini akan mencakup dua unit bak penampung limbah ( $\pm 10$  m<sup>2</sup>), enam unit *sand-filter* ( $\pm 10$  m<sup>2</sup>), unit turbin dan generator mikrohidro, serta lahan basah buatan seluas 15,9 m<sup>2</sup>.



Gambar 5. Area perkampungan batik Pasundan

Sisi area yang tersedia akan dioptimalkan sebagai ruang terbuka hijau dan zona resapan air, mengingat kawasan ini tidak memiliki sistem saluran air konvensional. Tanaman *Iris sp.* dipilih sebagai vegetasi penutup lahan karena memiliki kemampuan menyerap air yang tinggi sekaligus menambah nilai estetika lingkungan. Selain itu, lahan kosong kedua dapat diarahkan sebagai area edukatif, mencakup galeri batik dan saung untuk kegiatan *workshop* batik tulis, yang mendukung citra kampung sebagai sentra batik berkelanjutan.

### 3.4 Analisis Kelayakan Operasional dan Ekonomi

Desain sistem pengolahan limbah terintegrasi dengan pembangkit listrik mikrohidro pada Kampung Batik Pasundan bertujuan tidak hanya untuk meningkatkan kualitas lingkungan, tetapi juga untuk memberikan manfaat ekonomi yang berkelanjutan bagi masyarakat. Analisis kelayakan ekonomi ini disusun secara kualitatif-kuantitatif ringan berdasarkan estimasi sumber literatur dan studi kasus serupa.

#### 3.4.1 Estimasi komponen biaya

Sistem IPAL terintegrasi mikrohidro yang diusulkan dalam karya ini dirancang menggunakan material yang relatif mudah diperoleh di pasaran lokal dengan biaya investasi awal yang masih tergolong terjangkau untuk skala komunitas. Komponen utama sistem ini terdiri dari dua unit bak penampung limbah berkapasitas masing-masing 20.000 L, enam unit *sand-filter*, sistem lahan basah buatan (*constructed wetland*), dan satu unit pembangkit listrik tenaga mikrohidro sederhana.

Setiap *sand-filter* dirancang dalam bentuk tabung berdiameter 0,5 meter dan tinggi 1,40 meter, yang diisi dengan lapisan pasir (0,3 m<sup>3</sup>), kerikil (0,2 m<sup>3</sup>), dan

karbon aktif (0,5 m<sup>3</sup>) untuk masing-masing unit. Total kebutuhan media untuk enam unit *sand-filter* mencakup 1,8 m<sup>3</sup> pasir, 1,2 m<sup>3</sup> kerikil, dan 3 m<sup>3</sup> karbon aktif. Air limbah akan dialirkan dari bak penampung menuju *sand-filter* dan selanjutnya menuju sistem mikrohidro serta lahan basah buatan. Untuk mendukung distribusi air antar unit, disediakan juga pipa PVC dan sambungan sebanyak 20 batang.

Pada aspek pembangkitan energi, sistem ini memanfaatkan turbin kaplan skala kecil yang terhubung dengan generator dan inverter. Komponen kelistrikan tambahan seperti kabel dan trafo turut disiapkan untuk mengalirkan listrik hasil pembangkitan menuju titik beban seperti rumah produksi batik, taman, atau fasilitas publik. Selain itu, tanaman *Phragmites australis* (reeds) digunakan sebagai vegetasi utama dalam lahan basah buatan, dengan estimasi kebutuhan lahan sebanyak 40 rumpun. Tambahan vegetasi berupa tanaman Iris (30 rumpun) juga ditanam di area taman untuk fungsi estetika sekaligus penyerapan air hujan.

Untuk kondisi kontur lahan yang tidak memungkinkan aliran gravitasi penuh, disediakan satu unit pompa air listrik berdaya rendah sebagai antisipasi untuk mendistribusikan air antar unit. Dengan mempertimbangkan semua kebutuhan material tersebut, total estimasi biaya awal pembangunan sistem ini diperkirakan sebesar 15 hingga 20 juta rupiah. Estimasi ini belum termasuk biaya tenaga kerja dan alat berat, namun sudah mencakup seluruh komponen fungsional utama untuk operasional sistem.

#### 3.4.2 Biaya operasional dan pemeliharaan

Sistem IPAL terintegrasi mikrohidro yang dirancang dalam karya ini memiliki karakteristik *low-energy* dan *low-maintenance*, karena sebagian besar proses pengolahan limbah berlangsung secara alami melalui filtrasi dan aktivitas biologis dalam sistem lahan basah buatan. Biaya operasional utamanya meliputi penggantian karbon aktif setiap 1 hingga 2 tahun, pembersihan media *sand-filter*, perawatan tanaman pada lahan basah, serta pemeriksaan berkala sistem mikrohidro.

Kegiatan tersebut dapat dilakukan secara berkala oleh masyarakat lokal dengan keterampilan dasar. Estimasi total biaya pemeliharaan tahunan sebesar Rp1.500.000 hingga Rp2.000.000. Beban biaya ini tergolong ringan dan dapat ditanggung bersama melalui skema koperasi atau gotong royong warga, sehingga sistem tetap layak dioperasikan secara berkelanjutan.

#### 3.4.3 Manfaat ekonomi langsung dan tidak langsung

Penerapan sistem IPAL terintegrasi ini memiliki potensi manfaat ekonomi, baik secara langsung maupun tak langsung. Secara langsung, penggunaan energi mikrohidro dapat menghemat biaya listrik hingga 14% dari total konsumsi di Kampung Batik Pasundan, sementara air hasil olahan dapat digunakan kembali untuk proses produksi, sanitasi, dan penghijauan.

Secara tidak langsung, sistem ini mendukung *branding* produk batik sebagai produk ramah lingkungan, membuka peluang kolaborasi dengan program *corporate social responsibility* (CSR) atau lembaga donatur, serta dapat dikembangkan sebagai sarana edukasi dan wisata berbasis lingkungan.

#### 3.4.4 Strategi pembiayaan dan replikasi

Sebagai sistem berbasis masyarakat, pendanaan implementasi awal dapat melibatkan:

- Skema *Corporate Social Responsibility* (CSR),
  - Dana desa atau program Kemitraan Lingkungan,
  - Hibah dari lembaga swadaya atau inkubasi UMKM.
- Setelah fase awal berjalan, sistem ini dapat dijalankan secara swadaya melalui pengelolaan koperasi atau kelompok produksi batik. Terdapat potensi replikasi sistem yang sangat besar, mengingat banyaknya kampung batik atau sentra produksi UMKM di Indonesia yang menghadapi masalah serupa.

## 4. KESIMPULAN

Desain sistem pengolahan air limbah batik di Kampung Batik Pasundan mengintegrasikan *sand-filter*, pembangkit listrik tenaga mikrohidro, dan lahan basah buatan untuk mengatasi masalah limbah cair dan kebutuhan energi. Sistem ini mengolah 12.000 L limbah per hari dan menghasilkan 1.368,75 kWh energi listrik per tahun, setara 14% kebutuhan listrik daerah tersebut. Sistem *sand-filter* terdiri dari enam unit yang dioperasikan secara *batch*, mampu mengurangi TSS hingga 91,6% dan warna hingga 98%. Air hasil filter digunakan untuk menggerakkan turbin mikrohidro dengan *head* 1,5 meter dan efisiensi turbin 75%, menghasilkan energi sebesar 1.368,75 kWh per tahun atau setara 14% dari kebutuhan listrik tahunan Kampung Batik Pasundan (9.638 kWh). Sistem lahan basah buatan dirancang menggunakan tanaman *Phragmites australis* pada area seluas 15,9 m<sup>2</sup>, yang berdasarkan literatur mampu menurunkan BOD sebesar 75,39%, COD 64,78%, dan TSS 62,85%. Estimasi biaya pembangunan sistem berkisar antara Rp15–20 juta, dengan biaya operasional tahunan sekitar Rp1,5–2 juta, yang dapat ditanggung bersama oleh komunitas. Sistem ini dinilai efektif dan berpotensi sebagai solusi pengolahan limbah terdesentralisasi yang mendukung efisiensi sumber daya dan penggunaan energi bersih.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

Ahdiat, A. (2022). Usaha batik indonesia mayoritas berskala mikro. <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2022/10/02/usaha-batik-indonesia-mayoritas-berskala-mikro>

Anaza, S. O., Abdulazeez, M. S., Yisah, Y. A., Yusuf, Y. O., Salawu, B. U., & Momoh, S. U. (2017). Micro hydro-electric energy generation-An overview. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 6, 5–12.

Apriyani, N. (2018). Industri batik: Kandungan limbah cair dan metode pengolahannya. *Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, 3(1), 21–29. <https://doi.org/10.33084/mitl.v3i1.640>

Bianchi, E., Coppi, A., Nucci, S., Antal, A., Berardi, C., Coppini, E., Fibbi, D., Del Bubba, M., Gonnelli, C., & Colzi, I. (2021). Closing the loop in a constructed wetland for the improvement of metal removal: the use of *Phragmites australis* biomass harvested from the system as biosorbent. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(9), 11444–11453. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11291-0>

Febriyanti, C. P., & Winanti, E. T. (2020). Efektifitas pengolahan limbah cair industri batik sidoarjo menjadi air bening non-konsumsi menggunakan integrasi flocculation coagulation dan constructed wetland. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, 1(1), 1–10.

Firmansyah, G. A., & Rahmadyanti, E. (2019). Optimalisasi pengolahan air limbah industri batik menggunakan integrasi biofilter dan constructed wetlands sebagai sumber daya air terbarukan. *Rekayasa Teknik Sipil*, 3(1), 1–10. <https://jurnalmahasiswa.unesa.ac.id/index.php/rekayasa-teknik-sipil/article/view/31264>

García-Ávila, F. (2020). Treatment of municipal wastewater by vertical subsurface flow constructed wetland: Data collection on removal efficiency using *Phragmites Australis* and *Cyperus Papyrus*. *Data in Brief*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105584>

Haerulloh, A. A., Saringendyanti, E., & Septiani, A. (2021). Persebaran industri batik di Bandung, Cirebon, dan Tasikmalaya 1967-1998. *Patanjala: Journal of Historical and Cultural Research*, 13(1), 71. <https://doi.org/10.30959/patanjala.v13i1.662>

Kurniawati, E., & Sanuddin, M. (2020). Metode filtrasi dan adsorpsi dengan variasi lama kontak dalam pengolahan limbah cair batik. *Riset Informasi Kesehatan*, 9(2), 126–133. <https://doi.org/10.30644/rik.v8i2.452>

Meilanda, I. D., Handoyo, Mujiyono, & Suyanto, B. (2021). Potensi metode koagulasi, sedimentasi, dan variasi filtrasi dalam mereduksi kadar chrom dan sulfida pada limbah cair batik. *Canadian Journal of Chemistry*, 51(7), 1032–1040. <https://doi.org/10.1139/v73-153>

Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2019). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.16/Menlhk/Setjen/Kum.1/4/2019 Tentang Perubahan Kedua Atas Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Natsir, M., Amaludin, Liani, A. A., & Fahsa, A. D. (2021). Analisis kualitas BOD, COD, dan TSS limbah cair domestik (grey water) pada rumah tangga di kabupaten Maros 2021. *Jurnal Nasional Ilmu Kesehatan*, 1(2), 1–16.

Pratiwi, V. D., Kamal, N., & Juhanda, S. (2019). Analisis pengaruh waktu aktivasi dan adsorpsi dalam pemanfaatan karbon aktif dari serutan kayu menjadi adsorben limbah cair. *Jurnal Rekayasa Hijau*, 3(1), 71–78. <https://doi.org/10.26760/jrh.v3i1.2822>

Soeprijanto, & Karnaningroem, N. (2008). Perencanaan

penerapan constructed wetland untuk pengolahan efluen tangki septik. *Jurnal Purifikasi*, 9(1).

Suswati, A. C. S. P., & Wibisono, G. (2013). Pengolahan limbah domestik dengan teknologi taman tanaman air (constructed wetlands). *Indonesian Green Technology Journal*, 2(2013), 1–8.

Yuliana. (2021). Strategi pengolahan limbah batik : studi pustaka the management strategy of batik waste : Literature review. *Prosiding Seminar Nasional Industri Kerajinan Dan Batik Membangun Industri Kerajinan Dan Batik Yang Tangguh Di Masa Pandemi Yogyakarta*, 2(1), 1–7.

Zakaria, N., Rohani, R., Wan Mohtar, W. H. M., Purwadi, R., Sumampouw, G. A., & Indarto, A. (2023). Batik effluent treatment and decolorization—A review. *Water* (Switzerland), 15(7).  
<https://doi.org/10.3390/w15071339>