

Perencanaan Instalasi Pengolahan Lindi di Tempat Pengolahan Sampah Terpadu *Refused Derived Fuel* (TPST RDF) Cilacap

Ridha Rahmi Khairani dan Harmin Sulistiyoning Titah
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: harminsulis@gmail.com

Abstrak—Air lindi yang dihasilkan dari Tempat Pengolahan Sampah Terpadu *Refused Derived Fuel* (TPST RDF) Cilacap memiliki karakteristik yang melebihi baku mutu Perda Jateng Nomor 5 Tahun 2012. Parameter yang melampaui baku mutu yaitu BOD, COD, dan TSS. Debit lindi rata-rata berdasarkan pengukuran menggunakan metode tampung diketahui sebesar 6,46 m³/hari dan debit maksimum 8,50 m³/hari. Kualitas air lindi dari outlet bak pengumpul didapat dari hasil uji laboratorium memiliki konsentrasi BOD 12.084 mg/L, COD 18.424 mg/L, dan TSS 744 mg/L. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengolahan agar lindi yang dibuang ke badan air memenuhi baku mutu. Alternatif pengolahan yang direncanakan yaitu menggunakan *anaerobic baffled reactor* (ABR) dengan tangki sedimentasi, *anaerobic biofilter* (ABF), dan *constructed wetland* (CW). Hasil perhitungan DED unit dan dimensi (panjang x lebar x kedalaman) adalah sebagai berikut. Tangki sedimentasi (6,5 m × 2,2 m × 2 m), ABR 6 kompartemen (1 m × 2,2 m × 2 m), ABF 2 kompartemen (1,25 m × 2,2 × 1,8 m), dan CW (8 m × 5 m × 0,6 m). Biaya yang dibutuhkan untuk membangun instalasi pengolahan lindi adalah sebesar Rp286.008.088,00.

Kata Kunci—*Anaerobic Baffled Reactor* (ABR), *Anaerobic Biofilter* (ABF), *Constructed Wetland* (CW), Lindi, Pengolahan Limbah.

I. PENDAHULUAN

TPST RDF dibangun untuk mengolah sampah menjadi *Refused Derived Fuel* (RDF) sebagai bahan bakar, mengurangi kebutuhan lahan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), dan meningkatkan kualitas lingkungan. TPST RDF Cilacap berkapasitas 120 ton/hari dan telah melewati masa uji coba serta menunjukkan hasil sesuai dengan rencana. Pengolahan sampah menjadi RDF menggunakan sistem *biological drying* (*biodrying*). *Biodrying* merupakan pengolahan secara mekanis dan biologis yang mendekomposisi secara aerobik untuk mengeringkan dan sebagian menstabilkan sampah [1]. Proses tersebut dapat mengurangi kadar air sehingga meningkatkan nilai kalor hingga 30–40% dari sampah yang berkadar air yang tinggi [2]. Dengan adanya fasilitas TPST RDF, maka tidak akan ada ada sampah yang tersisa sama sekali kecuali air lindi.

Air lindi adalah limbah cair yang dihasilkan karena masuknya air eksternal ke dalam timbunan sampah, kemudian melarut dan membilas materi-materi terlarut seperti bahan organik hasil dekomposisi sampah [3]. Air lindi dapat berasal dari sumber eksternal, seperti air limpasan hujan dan air tanah serta sumber internal, seperti air yang dihasilkan dari proses penguraian sampah [4]. Produksi air lindi dapat mencemari lingkungan apabila tidak diolah dengan baik [5]. Parameter pencemar pada lindi antara lain BOD, COD, TSS, TDS,

bakteri fecal coliform [6] dan logam berat seperti besi (Fe), tembaga (Cu), seng (Zn), timbal (Pb), cobalt (Co), dan boron (Br) [7].

Pengolahan lindi dari TPST RDF saat ini belum dilakukan. Oleh karena itu, unit pengolahan air lindi diperlukan untuk mereduksi kandungan pencemar yang terkandung dalam air lindi. Perencanaan teknologi pengolahan lindi mempertimbangkan kemudahan pengoperasian, biaya konstruksi dan operasi, kebutuhan energi, serta ketersediaan lahan agar teknologi yang digunakan dapat diimplementasikan di lapangan.

II. METODOLOGI PERENCANAAN

A. Penentuan Ide, Rumusan Masalah, dan Tujuan

Ide perencanaan didapat setelah mengetahui adanya kesenjangan antara kondisi eksisting dan kondisi ideal pada subjek penelitian. Kondisi eksisting di TPST RDF Cilacap belum terdapat instalasi pengolahan lindi, sedangkan kondisi idealnya lindi diolah menggunakan metode tertentu hingga memenuhi baku mutu sebelum dibuang ke lingkungan. Baku mutu yang digunakan adalah Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah Nomor 5 Tahun 2012 Lampiran IX, yaitu baku mutu air limbah untuk usaha dan/atau kegiatan yang belum ditetapkan baku mutunya.

B. Pengumpulan Data

Pengumpulan data digunakan untuk mendapatkan berbagai informasi yang dibutuhkan dalam perencanaan yang akan dilakukan. Data yang digunakan pada perencanaan ini meliputi data primer dan data sekunder.

1) Data Primer

Data primer meliputi data pengukuran debit lindi inlet bak pengumpul menggunakan metode tampung selama 1 menit dengan 3x pengulangan, pengukuran kualitas lindi dari outlet bak pengumpul secara *grab sampling* dan diujikan di Laboratorium Lingkungan Cilacap, dan pengukuran bak pengumpul menggunakan *roll meter*.

2) Data Sekunder

Data sekunder berupa denah TPST RDF Cilacap dari *Google Earth*, perhitungan luas lahan tersedia menggunakan *Google Earth*, Harga Satuan Pekerjaan (HSP) Kabupaten Cilacap 2023, dan HSP Kota Semarang 2022.

C. Hasil dan Pembahasan

Hasil dan pembahasan meliputi menganalisis kualitas dan kuantitas air lindi, menghitung desain instalasi pengolahan lindi (IPL), menggambar desain IPL, menghitung BOQ, dan RAB.

Tabel 1.
Hasil Pengukuran Debit Lindi

Tanggal	Debit	
	L/menit	m ³ /hari
16 Maret 2023	5,90	8,50
21 Maret 2023	4,10	5,90
3 April 2023	3,45	4,97
Debit maksimum	5,90	8,50
Debit rata-rata	4,48	6,46

Tabel 2.
Karakteristik Lindi Outlet Bak Pengumpul

Parameter	Nilai	Satuan	Metode Analisis
pH	7,4		SNI 06-6989.11-2019
Suhu	32	°C	Elektrometri
COD	18.424	mg/L	SNI 6989.73-2009
BOD5	12.084	mg/L	SNI 6989.72-2009
TSS	744	mg/L	SNI 6989.03-2019
Nitrat	10,1	mg/L	Spektrofotometri
Nitrit	0,15	mg/L	SNI 06-6988.9-2004

D. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan diperoleh dari hasil dan pembahasan yang merupakan jawaban dari tujuan perencanaan. Saran dibuat agar perencana selanjutnya dapat melengkapi dan menyempurnakan perencanaan saat ini.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum TPST RDF Cilacap

TPST RDF Cilacap menggunakan sistem *biodrying* untuk mengeringkan sampah menjadi *Refused Derived Fuel* (RDF) yang digunakan sebagai bahan bakar. Pada proses *biodrying*, kadar air berkurang akibat penguapan menggunakan panas dari biodegradasi komponen sampah secara aerobik. Selain menguap, sebagian air dapat merembes melalui tumpukan sampah dan terkumpul di dasar reaktor *biodrying* sebagai lindi [8]. TPST ini mengolah sampah menjadi RDF secara kontinyu, yaitu 24 jam setiap hari. Oleh karena itu, lindi juga mengalir secara kontinyu. Hingga saat ini hanya terdapat bak pengumpul untuk mengumpulkan lindi dari TPST. Dimensi dari bak tersebut memiliki panjang 14,75 m, lebar 6,1 m, dan kedalaman 1,2 m.

B. Kuantitas dan Kualitas Lindi

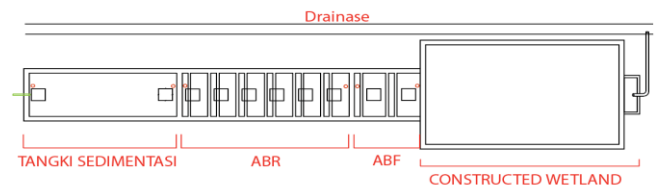
Hasil pengukuran debit dan pengujian karakteristik lindi ada pada Tabel 1 dan Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2 diketahui bahwa rasio BOD/COD adalah sebesar 0,65. Lindi termasuk limbah *biodegradable* karena memiliki rasio BOD/COD antara 0,1–1 [9] dan dapat diolah secara biologis. Parameter yang belum memenuhi baku mutu menurut Perda Jateng Nomor 5 Tahun 2012 adalah BOD, COD, dan TSS. Instalasi pengolahan lindi (IPL) akan dirancang berdasarkan hasil tersebut.

C. Perhitungan Detail Engineering Design

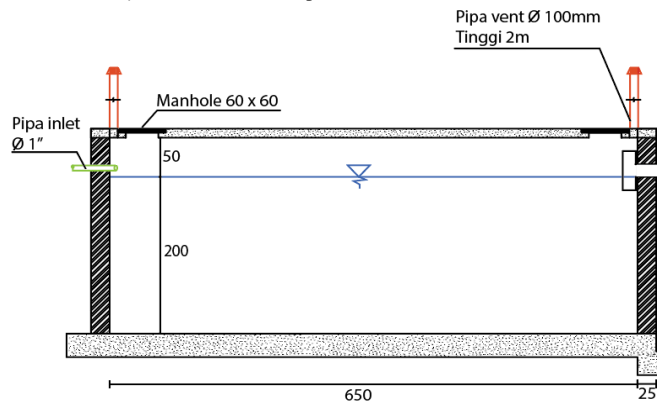
Perhitungan yang dilakukan meliputi perhitungan bangunan tangki sedimentasi, *anaerobic baffled reactor* (ABR), *anaerobic biofilter* (ABF), dan *constructed wetland* (CW). Perhitungan mengacu pada literatur [10]. Pengolahan yang terpilih disusun seperti pada Gambar 1.

Air lindi dialirkan ke bangunan IPL menggunakan pompa karena elevasi bak pengumpul lebih rendah dari elevasi bangunan IPL. Spesifikasi pompa *submersible*:

Merk: Grundfos



Gambar 1. Layout IPL rencana tanpa skala.



Gambar 2. Potongan tangki sedimentasi tanpa skala.

Tipe: SEG.A15.20.R1.2.1.603

Daya: 1,6 Kw

Debit: 4,17 L/s

Head: 17 m

1) Tangki Sedimentasi

Tangki sedimentasi pada bagian awal berfungsi mencegah masuknya padatan ke ABR. Potongan tangki sedimentasi tanpa skala disajikan pada Gambar 2. Berikut kriteria desain tangki sedimentasi.

1. *Hydraulic Retention Time* (HRT) saat $Q_{max} = 1,5-2,5$ jam
 2. Interval penyisihan lumpur = 1–2 tahun
 3. *Surface loading rate*: $< 0,6m^3/m^2$ jam
 4. Kedalaman = 1,5 m–2,5 m
 5. Rasio P/L = 3:1 atau 2:1
 6. *Freeboard* = >30 cm (dari pipa inlet)
 7. Pipa ventilasi = di atas outlet, $>2m$
 8. Manhole = satu di atas inlet dan satu di atas outlet
- Direncanakan:
9. $Q_{max} = 0,354 m^3/jam$
 10. Rasio SS/COD = 0,42 (0,35-0,45)
 11. HRT = 1,5 jam
 12. Interval waktu pengurasan = 1 tahun
 13. Kedalaman = 2 m
 14. Lebar = 2,2 m

Rumus yang digunakan untuk menghitung efisiensi pengolahan dan panjang tangki sedimentasi adalah sebagai berikut.

$$COD_{rem} = \frac{\text{rasio SS}}{0,6} \times \frac{COD}{COD} \times (HRT - 1) \times \frac{0,1}{2} + 0,3 \quad (1)$$

$$BOD_{rem} = COD_{rem} \times 1.06 \quad (2)$$

$$TSS_{rem} = \frac{HRT}{0,0075 + 0,014 (HRT)} \quad (3)$$

$$V_{lumpur} = 0,005 \times (1 - HRT \times 0,014) \times BOD_{removed} \times \text{interval pengurasan} \times Q \quad (4)$$

$$V_{air} = HRT \times Q_{max} \quad (5)$$

$$V_{total} = V_{lumpur} + V_{air} \quad (6)$$

$$\text{Panjang} = \frac{V_{total}}{\text{lebar} \times \text{kedalaman}} \quad (7)$$

Berdasarkan persamaan (1) hingga (7) didapatkan panjang tangki sedimentasi 6,5 m. Kualitas efluen tangki sedimentasi adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{BOD} &= 9.169,94 \text{ mg/L} \\ \text{COD} &= 14.232,54 \text{ mg/L} \\ \text{TSS} &= 334,8 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

2) Anaerobic Baffled Reactor (ABR)

ABR terdiri dari beberapa kompartemen yang dipasang secara seri. Hal ini bertujuan untuk mengolah zat yang sulit terurai pada kompartemen akhir, setelah bahan yang mudah terurai diolah di kompartemen awal. Aliran air antar kompartemen diarahkan menggunakan dinding penyekat atau *down-pipe* [10]. Potongan ABR tanpa skala disajikan pada Gambar 3. Berikut kriteria desain dan perhitungan desain ABR.

- Kedalaman = 1,5m–2,5m
- Lebar = < 3,5m per kompartemen
- Panjang *upflow chamber* = 0,7m–0,8m
- *Upflow velocity* (V_{up}) = < 1,1 m/jam
- HRT = > 8 jam
- Jumlah kompartemen = 4–6
- Beban organik = < 3 kg/m³/hari
- *Freeboard* = >30 cm
- Manhole = satu di atas setiap kompartemen
- Pipa ventilasi = di atas outlet, memanjang >2m

Direncanakan:

- Q_{ave} = 6,46 m³/hari
- Jumlah kompartemen (n) = 6
- Kedalaman (h) = 2 m
- Panjang *upflow* (P_u) = 0,75 m
- Panjang *downflow* (P_d) = 0,25 m
- Suhu = 30 °C

Berikut perhitungan desain ABR.

$$\text{Volume} = Q_{\max} \times \frac{[\text{BOD}_{in}]}{\text{beban BOD}_{\max}} \quad (8)$$

$$\text{Lebar (L)} = \frac{\text{Volume}}{n \times h \times (P_u + P_d)} \quad (9)$$

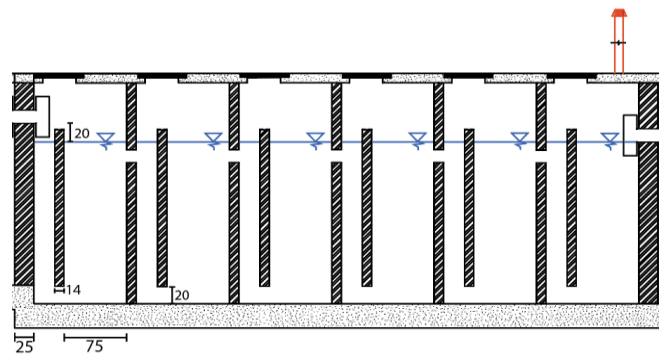
$$\text{HRT} = \frac{\text{Volume}}{(Q \times 105\%)} \quad (10)$$

$$V_{up} = \frac{Q_{\max}}{(P_u \times L)} \quad (11)$$

Berdasarkan persamaan (8) hingga (11) didapatkan Volume ABR 26,3 m³, lebar 2,2 m, HRT 93,47 jam, dan V_{up} 0,21 m/jam. Selanjutnya menentukan penyisihan BOD berdasarkan faktor *BOD overloading* (f_{overload}), faktor *strength* (f_{strength}), faktor *temperature* (f_{temp}), faktor HRT (f_{HRT}), dan faktor jumlah kompartemen (f_{chamber}). Selain itu juga dihitung penyisihan COD dan TSS. Berdasarkan grafik [10] didapatkan f_{overload} 1, f_{strength} 1,15, f_{temp} 1,05, f_{HRT} 1, dan f_{chamber} 1,08. Berdasarkan kelima faktor, maka nilai removal BOD menurut teorinya adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{BOD}_{\text{rem}} &= f_{\text{overload}} \times f_{\text{strength}} \times f_{\text{temp}} \times f_{\text{HRT}} \times F_{\text{chamber}} \quad (12) \\ &= 130,41\% \end{aligned}$$

Jika BOD teoritis > 95% maka nilai removal BOD yang diterapkan adalah 95% [10]. Efisiensi penyisihan COD didapatkan dengan mengalikan penyisihan BOD dengan faktor penyisihan COD terhadap BOD. Jika removal BOD \geq



Gambar 3. Potongan ABR tanpa skala.

0,85 maka faktornya adalah sebesar 0,9756. Maka persentase *removal* COD adalah 92,68%. ABR dapat menyisihkan TSS sebesar 91% [11]. Berdasarkan efisiensi penyisihan yang telah diketahui maka didapat konsentrasi efluen ABR sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{BOD} &= 458,50 \text{ mg/L} \\ \text{COD} &= 1.041,54 \text{ mg/L} \\ \text{TSS} &= 30,13 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

Air limbah dengan konsentrasi tinggi membutuhkan penambahan nitrogen (N) dan fosfor (P) untuk menunjang pertumbuhan bakteri anaerobik. Pada influen direkomendasikan rasio COD:N:P adalah 600:5:1 selama start up dan 300:5:1 selama operasi dalam jangka panjang [12].

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan N} &= \frac{5}{300 \times \text{COD}_{\text{tersisihkan}}} \quad (13) \\ &= 219,85 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan P} &= \frac{1}{300 \times \text{COD}_{\text{tersisihkan}}} \quad (14) \\ &= 43,97 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

Perhitungan produksi lumpur berdasarkan penyisihan COD dan TSS merujuk pada literatur [13].

$$P \times \text{VSS} = \frac{Q \times \gamma \times (S_o - S)}{1 + K_d \times \text{SRT}} \quad (15)$$

$$P \times \text{TSS} = Q \times (\text{TSS}_{in} - \text{TSS}_{out}) \quad (16)$$

$$P \times \text{total} = \frac{P \times \text{VSS}}{0,95} + P \times \text{TSS} \quad (17)$$

Keterangan:

$$Y = 0,06 \text{ g VSS/g COD}$$

$$K_d = 0,1 \text{ g VSS/g VSS.hari}$$

$$\text{SRT} = 30 \text{ hari}$$

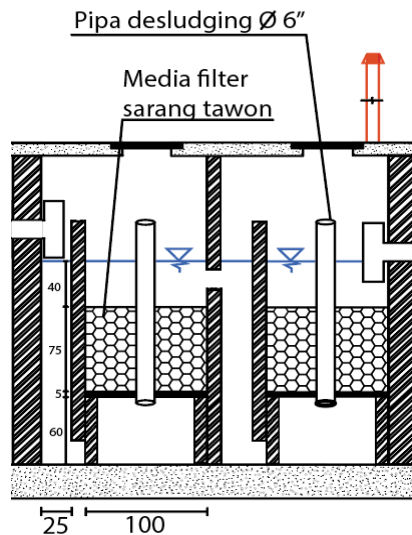
Berdasarkan persamaan (15) hingga (17) diketahui produksi lumpur ($P \times \text{total}$) sebanyak 3,47 kg/hari. Selanjutnya dihitung volume lumpur jika *Specific gravity* (S_g) lumpur 1,081, massa jenis air (ρ) 1.000 kg/m³, dan kadar *solid* 12%.

$$Q_{\text{lumpur}} = \frac{P \times \text{total}}{S_{g_{\text{lumpur}}} \times \rho_{\text{air}} \times \% \text{ solid}} \quad (18)$$

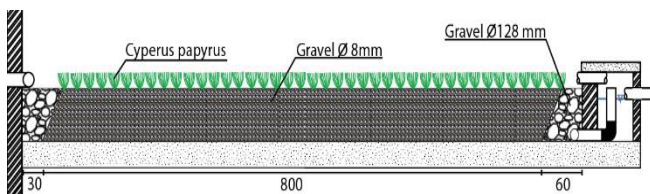
Didapatkan debit lumpur sebesar 9,76 m³/tahun.

Produksi biogas didasarkan pada asumsi bahwa 70% biogas adalah CH₄ dan terlarut 50% dan 350 L metana dihasilkan per 1 kg COD yang disisihkan [10].

$$\text{Produksi Biogas} = (\text{COD}_{in} - \text{COD}_{out}) \times Q \times \frac{0,35}{0,7 \times 0,5} \quad (19)$$



Gambar 4. Potongan ABF tanpa skala.

Gambar 5. Potongan *constructed wetland* tanpa skala.

Berdasarkan persamaan (19) diketahui produksi biogas dari ABR sebanyak 21,29 m³/hari.

3) Anaerobic Biofilter (ABF)

Berdasarkan hasil perhitungan diketahui bahwa konsentrasi efluen BOD dan COD dari ABR belum memenuhi baku mutu. Oleh karena itu dirancang *anaerobic biofilter* (ABF) agar memenuhi baku mutu. Potongan ABF tanpa skala disajikan pada Gambar 4. Berikut kriteria desain ABF [10].

- Panjang tangki filter = ≤ kedalaman tangki filter
- Lebar tangki filter = ≤ 3,5 m
- Jumlah tangki filter = 2–3
- *Hydraulic retention time* (HRT) = 24–48 jam
- V_{up} (dalam lubang filter) = < 2,0 m/jam
- Beban organik = < 4 kg/m³/hari COD
- Kedalaman = 1,5m–2,5m
- Ketinggian air di bawah perforated slab = 50–60 cm
- Freeboard = > 30 cm
- Tinggi material filter = 0,75–1 m

Direncanakan:

- Menggunakan media filter sarang tawon
- Kedalaman tangki filter (H) = 1,8 m
- Panjang *upflow* filter (Pu) = 1 m
- Panjang *downflow* (Pd) = 0,25 m
- Lebar tangki filter (L) = 2,2 m
- Jumlah tangki filter (n) = 2
- Permukaan spesifik media filter (A) = 226 m²/m³ [14]
- Rongga dalam massa filter (R) = 98% [14]
- Freeboard bawah (Fb) = 0,6 m
- Freeboard atas (Fa) = 0,4 m
- Kedalaman pelat filter (h) = 0,05 m

Perhitungan desain merujuk pada literatur [10].

$$\text{Ketinggian filter (d)} = H - F_b - F_a - h \quad (20)$$

$$\text{HRT} = H - d(1 - R)(P_u)(L)(n) + \frac{(P_d)(L)(H)}{Q} \quad (21)$$

$$V_{\max} \text{ filter} = \frac{Q_{\max}}{L \times P_u \times R} \quad (22)$$

$$\text{Net volume} = (P_u \times L \times n) - (H - d(1 - R)) + P_d \times L \times H \quad (23)$$

$$\text{Beban COD} = Q \times \frac{\text{COD}_{\text{in}}}{\text{nett volume}} \quad (24)$$

Berdasarkan persamaan (20) sampai (24) didapatkan ketinggian filter 0,75 m, HRT 32,88 jam, V_{\max} 0,16 m/jam, net volume 8,84 m³/jam, dan beban COD 0,76 kg COD/m³.hari. Selanjutnya menentukan penyisihan BOD berdasarkan faktor faktor *temperature* (f-temp), *COD loading* (f-load), faktor konsentrasi (f-strength), faktor permukaan filter (f-surface), faktor HRT (f-HRT), dan faktor jumlah tangki (f-chamber). Selain itu juga dihitung penyisihan COD dan TSS. Berdasarkan grafik [10] didapatkan f-temp 1,1, f-load 1, f-strength 0,96, f-surface 1,06, f-HRT 0,7, dan f-chamber 1,08. Berdasarkan keenam faktor, maka nilai removal BOD menurut teorinya adalah sebagai berikut.

$$\text{BOD}_{\text{rem}} = f_{\text{overload}} \times f_{\text{strenght}} \times f_{\text{temp}} \times f_{\text{HRT}} \times F_{\text{chamber}} \quad (25)$$

$$= 83,41\%$$

Efisiensi penyisihan BOD didapatkan dengan mengalikan penyisihan COD dengan faktor penyisihan BOD terhadap BOD. Dengan BOD_{rem} 83,41% didapatkan faktor 1,04. Maka persentase removal BOD adalah 86,82%. Penyisihan TSS adalah sebesar 41,99% [15]. Berdasarkan efisiensi penyisihan yang telah diketahui maka didapat konsentrasi efluen ABF sebagai berikut.

$$\text{BOD} = 60,38 \text{ mg/L}$$

$$\text{COD} = 172,79 \text{ mg/L}$$

$$\text{TSS} = 17,48 \text{ mg/L}$$

Kebutuhan N dan P dihitung menggunakan persamaan (13) dan (14) sehingga diketahui kebutuhan N 14,48 mg/L dan kebutuhan P 2,90 mg/L. Perhitungan produksi lumpur berdasarkan penyisihan COD dan TSS menggunakan persamaan (15) hingga (17). Berdasarkan perhitungan tersebut diketahui volume lumpur sebanyak 0,51 m³/tahun. Perhitungan produksi biogas menggunakan persamaan (19) dan hasilnya adalah 1,40 m³/hari.

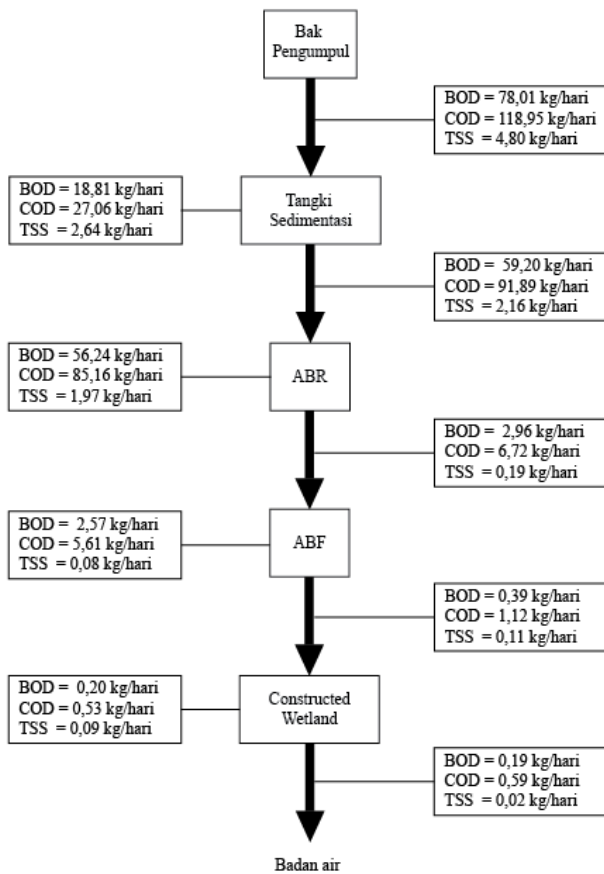
4) Constructed Wetland

Air limbah harus diolah terlebih dahulu terutama untuk padatan tersuspensi, karena unit ini mudah mengalami *clogging*. Lindi akan mengalir secara horizontal melalui akar tanaman yang ditanam. Pengolahan menggunakan *constructed wetland* terdiri dari proses penyaringan, aerasi karena adanya tanaman, serta penyerapan nutrien oleh akar tanaman [10]. Potongan *constructed wetland* tanpa skala disajikan pada Gambar 5. Tanaman yang akan digunakan di *constructed wetland* ini adalah *Cyperus papyrus*. Tanaman ini memiliki waktu respon yang lebih kecil dibandingkan dengan *Typha angustifolia* dan *Canna indica*. *Sub Surface Flow* (SSF) *constructed wetland* yang ditanami *Cyperus papyrus* memiliki efisiensi penyisihan sebesar 94,81% dan 94,72% untuk BOD dan COD dengan waktu detensi selama 2 hari. Berikut data perencanaan yang digunakan.

$$\text{Debit (Q)} = 6,46 \text{ m}^3/\text{hari}$$

$$\text{BOD}_{\text{in}} = 60,38 \text{ mg/L}$$

$$\text{COD}_{\text{in}} = 172,79 \text{ mg/L}$$



Gambar 6. Diagram kesetimbangan massa.

TSS_{in} = 17,48 mg/L

Suhu rata-rata = 27,39 °C

Digunakan media *gravelly sand* berdiameter 8 mm

Konduktivitas hidrolis (K) = 4.998,76 m/hari

Porositas = 0,35

BOD_{out} yang diharapkan = 30 mg/L

Kemiringan dasar (S) = 1%

Kedalaman bed filter = 0,6 m

BOD_{max} pada luas penampang inlet = 150 g/m².hari

Beban BOD_{max} pada permukaan = 10g/m².hari

Perhitungan

$$BOD_{rem} = \frac{BOD_{in} - BOD_{out}}{BOD_{in}} \quad (26)$$

Berdasarkan persamaan (26) maka BOD_{rem} yang dibutuhkan agar memenuhi BOD_{out} yang diharapkan adalah sebesar 50,31%. Selanjutnya menentukan COD_{rem} menggunakan faktor efisiensi removal COD berdasarkan removal BOD.

$$\text{Faktor} = \frac{(BOD_{rem} - 0,5) \times 0,065}{0,25 + 1,06} \quad (27)$$

$$= 1,06$$

$$COD_{rem} = \frac{BOD_{rem}}{\text{faktor}} \quad (28)$$

$$COD_{rem} = 47,43\%$$

Constructed wetland dapat menyisihkan TSS 78% [16].

Berdasarkan efisiensi penyisihan yang telah diketahui maka didapat kualitas efluen *constructed wetland* sebagai berikut.

BOD = 40 mg/L

COD = 90,84 mg/L

TSS = 3,85 mg/L

Selanjutnya menentukan HRT menggunakan faktor HRT-suhu dan faktor BOD-HRT.

$$\text{Faktor HRT - Suhu} = 13 - (\text{Suhu} - 25) \times 6/5 \quad (29)$$

$$= 10,13 \text{ hari}$$

$$\text{Faktor BOD - HRT} = (BOD_{rem} - 0,4) \times 31/35 + 0,22 \quad (30)$$

$$= 0,31$$

$$\text{HRT} = \text{Faktor HRT - Suhu} \times \text{Faktor BOD - HRT} \quad (31)$$

$$= 3,15 \text{ hari}$$

$$\text{HRT dalam rongga pori 35\%} = \text{HRT} \times 35\% \quad (32)$$

$$= 1,10 \text{ hari}$$

$$\text{Luas penampang 1} = Q / K \times S \quad (33)$$

$$= 0,13 \text{ m}^2$$

$$\text{Luas penampang 2} = Q \times BOD_{in} / BOD_{max} \text{ penampang} \quad (34)$$

$$= 2,60 \text{ m}^2$$

Dipilih luas penampang yang lebih besar antara penampang 1 dan 2. Sehingga luas penampang yang dipilih, yaitu penampang 2 seluas 2,60 m².

$$\text{Lebar} = \text{Luas penampang} / \text{kedalaman} \quad (35)$$

$$= 4,5 \text{ m}$$

$$\text{Luas permukaan 1} = Q \times (BOD_{in} - BOD_{out}) / BOD_{maks} \quad (36)$$

$$= 19,63 \text{ m}^2$$

$$\text{Luas permukaan 2} = Q \times \text{HRT} / \text{kedalaman} \quad (37)$$

$$= 33,97 \text{ m}^2$$

Luas permukaan yang dipilih yaitu salah satu yang lebih besar dari luas permukaan 1 dan 2. Sehingga luas yang dipilih yaitu luas permukaan 2 seluas 33,97 m².

$$\text{Panjang} = \text{Luas permukaan} / \text{lebar} \quad (38)$$

$$= 8 \text{ m}$$

Cek beban BOD pada permukaan

$$\text{Beban hidrolis} = Q / \text{luas permukaan} \quad (39)$$

$$\text{Beban BOD} = \text{Beban hidrolis} \times BOD_{in} \quad (40)$$

Berdasarkan persamaan (39) dan (40) maka didapat nilai beban BOD 9,75 g/m².hari. Nilai ini tidak melampaui beban BOD_{max} pada permukaan, sehingga luas permukaan yang digunakan sudah mencukupi.

Dalam pengolahan air limbah secara aerobik, rasio BOD:N:P harus berada dalam rentang 100:10:1 dan 100:5:1 [12]. Pada perencanaan ini digunakan rasio BOD:N:P 100:7,5:1. Berikut perhitungan kebutuhan N dan P.

$$\text{Kebutuhan N} = 7,5 / 100 \times (BOD_{in} - BOD_{out}) \quad (41)$$

$$= 2,28 \text{ mg/L}$$

$$\text{Kebutuhan P} = 1 / 100 \times (BOD_{in} - BOD_{out}) \quad (42)$$

$$= 0,60 \text{ mg/L}$$

D. Kesetimbangan Massa

Keseimbangan massa dihitung untuk memastikan bahwa jumlah massa yang masuk ke unit pengolahan air lindi sama dengan jumlah massa yang keluar dari unit pengolahan tersebut. Perhitungan kesetimbangan massa menggunakan Persamaan (43).

$$\text{Massa} = \text{konsentrasi} \times \text{debit} \quad (43)$$

Tabel 3.
Profil Hidrolisis

Unit Bangunan	Jenis Headloss	Headloss (m)	Jumlah Headloss (m)	Muka Air (m)
Tangki sedimentasi	Kecepatan	0,00000000008	0,2	12,09
	Beda tinggi dasar bangunan	0,2		
ABR	Kecepatan (<i>downflow</i>)	0,0000000026	0,2	11,89
	Belokan	0,0000000034		
	Hf kecepatan (<i>upflow</i>)	0,0000000008		
ABF	Beda tinggi pipa efluen ABR-ABF	0,2	7E-07	11,69
	Kecepatan (<i>downflow</i>)	0,00000000023		
	Belokan	0,00000000040		
	Kecepatan (<i>upflow</i>)	0,00000000012		
CW	Media filter	0,00000069	0,19	11,69
	Hf media tanam	0,00344619		
	Hf slope	0,08900000		
	Hf penyangga inlet	0,00000969		
	Hf penyangga outlet	0,00000969		
	Beda tinggi pipa outlet CW-pipa outlet ke drainase	0,10000000		
	Beda tinggi pipa outlet ke drainase-drainase	0,1		

Tabel 4.
Rancangan Anggaran Biaya

Pekerjaan	Satuan	Jumlah harga (Rp)
Pemasangan Pipa PPR diameter 1"	m	14.104.810
Penggalian Tanah Biasa Sedalam s.d. 1 m	m ³	168.463
Urugan pasir urug	m ³	298.998
Pengurangan kembali galian tanah	m ³	86.236
Pembongkaran Beton (mekanis)	m ³	204.277
Pengadaan dan pemasangan pompa submersible	unit	27.566.550
Pembersihan dan pengupasan permukaan tanah	m ²	1.347.729
Galian struktur dengan kedalaman 0–2 meter	m ³	23.782.855
Pembuatan beton mutu f _c = 26,4 Mpa (K300)	m ³	102.534.905
Membuat beton mutu f _c = 7,4 MPa (K-100)	m ³	16.499.563
Pemasangan bekisting untuk plat lantai beton bangunan gedung	m ²	26.749.516
Pemasangan dinding bata merah (5x11x22) cm tebal 1 batu campuran 1SP : 2PP	m ²	12.381.075
Pemasangan dinding bata merah (5x11x22) cm tebal ½ batu campuran 1SP : 2PP	m ²	11.417.943
Pemasangan plesteran 1SP : 2PP tebal 15 mm	m ²	26.457.717
Gravel pack 2 mm–10 mm	m ³	11.307.648
Pemasangan batu pecah 10–15 cm	m ³	1.272.110
Penanaman tanaman pada constructed wetland	m ²	2.175.800
Pemasangan filter	m ³	6.582.824
Pengurangan kembali hasil galian tanah	m ³	1.069.070
Jumlah		286.008.088

Kesetimbangan massa pada setiap unit pengolahan yang direncanakan ada pada Gambar 6.

E. Pengelolaan Biogas

Biogas merupakan gas yang dihasilkan dari proses fermentasi bahan organik oleh bakteri anaerob. Berdasarkan volumenya, biogas mengandung metana 45-75%, karbon dioksida 25-55%, dan komponen lainnya seperti hidrogen (H₂), nitrogen (N₂), hidrogen sulfida (H₂S) dan uap air. Biogas harus dimurnikan karena hanya gas metana yang dapat digunakan sebagai bahan bakar. Kandungan gas lainnya dapat merugikan, contohnya yaitu gas CO₂ dapat mengurangi nilai kalor pembakaran dan gas H₂S menyebabkan korosi pada ruang pembakaran. Salah satu proses untuk meningkatkan konsentrasi gas metana pada biogas adalah dengan filterisasi [17]. Salah satu bahan yang dapat digunakan sebagai filter adalah kapur tohor. Biogas yang sudah dimurnikan akan mengandung metana > 70 %. Metana ini kemudian diteruskan pada penyimpanan berupa balon plastik PVC. Metana yang sudah dimurnikan dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan genset melalui gerakan mekanik diesel. Sebanyak 1 m³ biogas dapat dikonversikan menjadi energi listrik sebesar 4,7 kWh [18]. Berikut perhitungan potensi energi listrik dari biogas.

Jumlah biogas dari IPL = 29,46 m³/hari

Biogas murni = 70% x 29,46 m³/hari
= 20,62 29,46 m³/hari

Energi listrik = 20,62 m³/hari x 4,7 kWh/1 m³ biogas
= 96,92 kWh

F. Pengelolaan Lumpur

Lumpur adalah produk samping dari pengolahan air limbah yang berbahaya terhadap lingkungan sebab mengandung mikroorganisme patogen dan konsentrasi polutannya sangat tinggi [13]. Salah satu alternatif unit pengeringan lumpur untuk menurunkan kandungan air dari lumpur hasil olahan yakni menggunakan *sludge drying bed* (SDB). Lumpur dari tangki sedimentasi, ABR, dan ABF direncanakan disalurkan ke SDB eksisting yang memiliki dimensi panjang 30 m, lebar 7 m, dan kedalaman 0,6 m. Lumpur akan dikuras setiap tahun dan dikeringkan selama 6 minggu di SDB. Berikut perhitungannya.

Q lumpur tangki sedimentasi = 28,17 m³/tahun

Q lumpur ABR = 9,76 m³/tahun

Q lumpur ABF = 0,51 m³/tahun

Volume lumpur (V) = (28,17 + 9,76 + 0,51) m³
= 38,44 m³

Kedalaman lumpur = V / luas permukaan SDB
= 38,44 m³ / (30 m x 7 m)
= 0,183 m

% *solid* lumpur awal = 12%

% *air cake* matang = 50%

% *solid cake* matang = 50%

Sg lumpur = 1,081

$$\text{Densitas cake} = 1.039 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{\text{cake}} = \frac{V_{\text{lumpur awal}} \times \% \text{ solid lumpur awal}}{\% \text{ solid cake}} \quad (43)$$

$$= 9,23 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{filtrat}} = \text{Volume lumpur awal} - \text{volume cake} \quad (44)$$

$$= 29,21 \text{ m}^3$$

G. Profil Hidrolis

Profil hidrolis merupakan gambaran yang menunjukkan garis ketinggian muka air dalam tiap unit bangunan pengolah limbah ketika proses berlangsung. Beberapa penyebab *head-loss*, yaitu belokan, kecepatan aliran, dan media filter [12].

$$H_f \text{ belokan} = \left(\frac{v \cdot n}{R^{2/3}} \right)^2 \times L \quad (45)$$

$$H_f \text{ kecepatan} = f \times \frac{L}{4R} \times \frac{v^2}{2g} \quad (46)$$

$$f = 1,5 \times \left(0,01989 + \frac{0,0005078}{4R} \right) \quad (47)$$

Keterangan:

v = kecepatan aliran (m/s)

n = koefisien kekasaran

R = jari-jari hidrolis (m)

L = panjang belokan (m)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

$$H_f \text{ filter} = 1,067 \times \frac{C_D \times L \times v^2}{\psi \times d \times e^4 \times g} \quad (48)$$

$$N_{Re} = \frac{\psi \times \rho \times d \times v}{\mu} \quad (49)$$

$$N_{Re} < 1: C_D = \frac{24}{N_{Re}} \quad (50)$$

Keterangan:

L = kedalaman filter (m)

e = porositas media

v = kecepatan filtrasi (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

d = ukuran rongga media (m)

ψ = faktor bentuk

μ = viskositas dinamis (kg/m.s)

ρ = massa jenis (kg/m³)

Hasil perhitungan *headloss* pada Tabel 3.

H. Rancangan Anggaran Biaya (RAB)

Perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB) didasarkan pada HSP Kabupaten Cilacap 2023 dan HSP Kota Semarang 2022. Perhitungan *headloss* disajikan pada Tabel 4.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan terdiri dari 4 poin, yakni: (1) Lindi dari TPST RDF memiliki suhu yang hangat, pH basa lemah mendekati netral, dan kandungan organik yang tinggi namun bersifat biodegradable. Hasil pengukuran debit diketahui bahwa debit rata-rata sebesar 6,46 m³/hari dan debit maksimum 8,50 m³/hari. (2) Unit pengolahan lindi yang dapat digunakan agar memenuhi baku mutu adalah *anaerobic baffle reactor* (ABR), *anaerobic biofilter* (ABF), dan *constructed wetland*. (3) Desain unit pengolahan lindi, yaitu tangki sedimentasi dengan dimensi lebar 2,2 m, panjang 6,5 m, kedalaman 2 m, serta HRT 1,5 jam. ABR dengan 6 kompartemen yang masing-masing memiliki dimensi lebar 2,2 m, panjang

downflow 0,25 m, panjang *upflow* 0,75 m, kedalaman 2 m, serta total HRT 93,47 jam. ABF 2 kompartemen yang masing-masing memiliki dimensi lebar 2,2 m, panjang *downflow* 0,25 m, panjang *upflow* 1 m, kedalaman 1,8 m, dan total HRT 32,10 jam. *Constructed wetland* memiliki dimensi lebar 5 m, panjang 8 m, kedalaman 0,6 m, dan HRT 3,15 hari dengan menggunakan tumbuhan *Cyperus papyrus*. (4) Biaya yang dibutuhkan untuk membangun unit pengolahan lindi adalah Rp286.008.088,00.

Saran yang ingin disampaikan penulis adalah (1) Perlu dilakukan *sampling* N dan P agar perhitungan kebutuhan nutrisi lebih akurat. (2) Diperlukan perencanaan lebih lanjut untuk pengelolaan gas metana.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. J. Colomer-Mendoza, L. Herrera-Prats, F. Robles-Martínez, A. Gallardo-Izquierdo, dan A. B. Piña-Guzmán, "Effect of airflow on biodrying of gardening wastes in reactors," *J. Environ. Sci.*, vol. 25, no. 5, hal. 865–872, Mei 2013, doi: 10.1016/S1001-0742(12)60123-5.
- [2] A. P. Tom, A. Haridas, dan R. Pawels, "Biodrying Process Efficiency: Significance of Reactor Matrix Height," *Procedia Technol.*, vol. 25, hal. 130–137, Jan 2016, doi: 10.1016/J.PROTCY.2016.08.240.
- [3] I. W. Widiarti dan E. Muryani, "Kajian kualitas air lindi terhadap kualitas air tanah di sekitar TPA (tempat pemrosesan akhir) sampah jetis, desa pakem, kecamatan gebang, Purworejo, Jawa Tengah," *J. Tanah dan Air (Soil Water Journal)*, vol. 15, no. 1, hal. 1–9, 2018, doi: <https://doi.org/10.31315/jta.v15i1.2721>.
- [4] W. Harmandar, "Pengolahan Lanjutan Air Lindi TPA Cipayang Depok dengan Metode Constructed Wetlands," Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Indonesia, Depok, 2010.
- [5] O. J. Notonugroho, M. F. Kahendran, A. B. Wiwiyanti, D. Nauval, C. A. Arif, dan A. Kurniawan, "Efek kecepatan pengendapan terhadap perencanaan unit sedimentasi primer pada pengolahan air lindi," *J. Tek. Sipil Inst. Teknol. Padang*, vol. 9, no. 2, hal. 3, Jul 2022, doi: 10.21063/jts.2022.V902.03.
- [6] D. E. Thiesya, E. Muryani, dan I. W. Widiarti, "Kajian Kualitas Air Sumur Tercemar Air Lindi di TPA Jetis, Desa Pakem, Kecamatan Gebang, Kabupaten Purworejo, Provinsi Jawa Tengah," *Pros. Semin. Nas. Tek. Lingkung. Kebumihan SATU BUMI*, vol. 1, no. 1, 2019, doi: <https://doi.org/10.31315/psb.v1i1.9054>.
- [7] A. T. M. & Tri M. Hidayati Karamina, "Kandungan logam berat fe, cu, zn, pb, co, br pada air lindi di tiga lokasi tempat pembuangan akhir (tpa) dadaprejo, kota batu, dau dan supit urang, kabupaten malang," *J. Ilm. Hijau Cendekia Vol.*, vol. 6, no. September, hal. 51–57, 2021.
- [8] C. A. Velis, P. J. Longhurst, G. H. Drew, R. Smith, dan S. J. T. Pollard, "Biodrying for mechanical–biological treatment of wastes: A review of process science and engineering," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 11, hal. 2747–2761, 2009, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2008.12.026.
- [9] G. Samudro dan S. Mangkoedihardjo, "Review on bod, cod and bod/cod ratio: a triangle zone for toxic, biodegradable and stable levels," *Int. J. Acad. Res.*, vol. 2, no. 4, hal. 235–239, 2010.
- [10] L. Sasse, *DEWATS: Decentralised wastewater treatment in developing countries*. Germany: BORDA, Bremen Overseas Research and Development Association, 1998. ISBN: 9781843801283.
- [11] S. Singh, R. Haberl, O. Moog, R. R. Shrestha, P. Shrestha, dan R. Shrestha, "Performance of an anaerobic baffled reactor and hybrid constructed wetland treating high-strength wastewater in Nepal—A model for DEWATS," *Ecol. Eng.*, vol. 35, no. 5, hal. 654–660, Mei 2009, doi: 10.1016/J.ECOLENG.2008.10.019.
- [12] P. R. Eka, "Perencanaan Instalasi Pengolahan Air Limbah dan Sistem Daur Ulang Air Hotel Budget Kota Surabaya," Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [13] D. G. Hutagaol dan W. Herumurti, "Perencanaan Pengurasan dan penerangan lumpur skala kecil ipald-t kabupaten Gresik," *J. Tek. ITS*, vol. 9, no. 2, hal. 224–230, 2020, doi: 10.12962/j23373539.v9i2.56882.
- [14] N. I. Said, "Pengolahan air limbah industri kecil tekstil dengan proses biofilter anaerob-aerob tercelup menggunakan media plastik sarang tawon," *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 2, no. 2, hal. 124–135, 2002.
- [15] P. Arumugam *et al.*, "The potential of decentralised wastewater treatment in urban and rural sanitation in South Africa: lessons learnt from a demonstration-scale DEWATS within the eThekweni Municipality," *Water SA*, vol. 49, no. 1, hal. 8–18, 2023, doi: 10.17159/wsa/2023.v49.i1.3985.
- [16] M. Salem, M. EL-Sayed Gabr, M. Mossad, dan H. Mahanna, "Random

- forest modelling and evaluation of the performance of a full-scale subsurface constructed wetland plant in Egypt," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 6, hal. 101778, Nov 2022, doi: 10.1016/J.ASEJ.2022.101778.
- [17] A. Rozaq, "Perancangan Filter Purifikasi Biogas Menggunakan Wet Scrubber," Departemen Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.
- [18] A. T. Mughraha dan S. I. Haryudo, "Pemanfaatan kotoran sapi sebagai energi alternatif pembangkit tenaga listrik berskala rumah tangga," *J. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 3, hal. 725–732, Mar 2020, doi: <https://doi.org/10.26740/jte.v9n3.p725%20-%20732>.