

# Analisis Tekno-Ekonomi dari *Refuse-Derived Fuel* sebagai *Waste To Energy* di TPA Pakusari Jawa Timur

Eka Yulia Indri Christanti<sup>1</sup>, I Nyoman Satya Kumara<sup>2</sup>, Cokorde Gede Indra Partha<sup>3</sup>

[Submission: 19-07-2022, Accepted: 15-08-2022]

**Abstract**—The problem with waste in Jember Regency is that waste management has not been maximized. The abundant availability of combustible waste can be used as RDF as waste to energy. This study analyzed the potential RDF and the feasibility of constructing a PLTSA at TPA Pakusari using the life cycle cost method and the electricity cost is calculated by LCoE. Waste management of refuse-derived fuel in order to meet the quality standards of RDF is carried out by pre-treatment in the form of sorting, enumeration, natural or mechanical drying, and sifting. The capacity of RDF is 83.762 kg/day, with a potential power generated using gasification technology of 1.000.621 Watt. The level of GHG emissions produced is 1,8 tCO<sub>2</sub>. The PLTSA project plan is equipped with an air pollution management unit. The results of the economic analysis show that the LCC value during a lifetime is Rp. 75.903.806.400. The feasibility of the Pakusari PLTSA development plan is declared feasible with a PBP value of 13 years. The NPV value with an interest rate of 8,5% is Rp. 22.065.398.707, and the IRR value is 14,35%. In the profitability index and net B/C criteria, the project is declared feasible with a value of 2,3.

**Intisari**—Permasalahan sampah yang terjadi di Kabupaten Jember yaitu pengelolaan sampah yang belum maksimal. Ketersediaan sampah mudah terbakar yang melimpah dapat dijadikan *refuse-derived fuel* sebagai *waste to energy*. Pada penelitian ini dilakukan analisis potensi *refuse-derived fuel* dan kelayakan pembangunan PLTSA di TPA Pakusari menggunakan metode *life cycle cost*, serta biaya listrik dihitung dengan LCoE. Pengelolaan sampah menjadi *refuse-derived fuel* agar memenuhi standar kualitas RDF dilakukan *pre-treatment* berupa pemilahan, pencacahan, pengeringan secara alamiah maupun mekanik, dan pengayakan. Kapasitas RDF sebesar 83.762 kg/hari dengan potensi daya yang dihasilkan teknologi gasifikasi sebesar 1.000.621 Watt, tingkat emisi GRK yang dihasilkan pembangkit sebesar 1,8 tCO<sub>2</sub>. Pada perencanaan proyek PLTSA dilengkapi dengan unit pengelolaan pencemaran udara. Hasil analisis ekonomi menunjukkan bahwa nilai LCC selama masa *lifetime* sebesar Rp. 75.903.806.400. Kelayakan perencanaan pembangunan PLTSA Pakusari dinyatakan layak dengan nilai PBP selama 13 tahun, nilai NPV dengan tingkat suku bunga 8,5 % adalah Rp. 22.065.398.707 dan nilai IRR sebesar 14,35 %. Pada kriteria *profitability index* dan *net B/C* proyek dinyatakan layak dengan nilai 2,3.

**Kata Kunci**—Waste to Energy, Refuse-Derived Fuel, Emisi Gas Rumah Kaca, Life Cycle Cost.

## I. PENDAHULUAN

Berdasarkan data *Indonesia National Plastic Action Partnership* pada April 2020 menyatakan bahwa sampah Indonesia sebanyak 67,2 juta ton/tahun masih tertimbun. Menurut data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional pada tahun 2021, Provinsi Jawa Timur menghasilkan timbunan sampah sebesar 2,63 juta ton berada di urutan kedua dari 200 kabupaten/kota di Indonesia. Kabupaten Jember yaitu kabupaten di Provinsi Jawa Timur yang menghasilkan timbunan sampah sebesar 800 ton/hari, dengan 300 ton sampah terkelola, sementara sisanya sebesar 500 ton sampah tidak terkelola [1]. Permasalahan sampah yang terjadi di Kabupaten Jember salah satunya tentang pengelolaan sampah yang belum maksimal, sedangkan sampah terus meningkat seiring pertambahan jumlah penduduk yang menyebabkan berkurangnya ketersediaan lahan untuk tempat penampungan sementara dan tempat pemrosesan akhir (TPA) [2]. Kabupaten Jember memiliki 5 TPA Sampah antara lain TPA Pakusari, TPA Ambulu, TPA Kencong, TPA Balung, dan TPA Tanggul. Menurut narasumber, kapasitas TPA sampah terbesar yaitu TPA Pakusari dengan rata-rata jumlah sampah sekitar 133 ton/hari. Sampah yang tertampung di TPA Pakusari apabila tidak segera dikelola akan menyebabkan dampak terhadap lingkungan dalam lingkup lokal, seperti polusi udara, polusi tanah, polusi air [3]. Dampak terhadap lingkungan dalam lingkup global, seperti pemanasan global.

Metode yang dapat diimplementasikan sebagai upaya optimalisasi pengelolaan sampah yaitu dengan memanfaatkan sampah menjadi sumber daya energi terbarukan [4]. Hal tersebut bertujuan untuk mencapai target bauran energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 paling sedikit 23% dan 31% pada tahun 2050 yang telah tercantum pada PP No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. Teknologi yang saat ini dikembangkan dalam pengolahan sampah antara lain teknologi pirolisis, gasifikasi, insinerasi dan plasma gasifikasi. Pada proses gasifikasi, bahan baku (*feedstock*) akan dioksidasi dengan kondisi keterbatasan oksigen (oksidasi parsial), sehingga terjadi pembakaran tidak sempurna. Proses konversi ini, 85% energi kimia dalam sampah diubah dalam bentuk gas (*synthetic gas* atau *syngas*) [5]. *Syngas* dapat dipergunakan secara *co-firing* dengan gas alam pada pembangkit listrik turbin gas, sehingga dapat mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Hasil pembakaran proses gasifikasi lainnya yaitu berupa sisa padatan (abu, arang, logam, dan lain-lain) [6]. Produk sisa pembakaran seperti abu halus (*fly ash*) dapat dikelola oleh perusahaan pengolahan limbah B3, limbah *slag* dapat

<sup>1</sup>Mahasiswi Sarjana Teknik Elektro, Program Sarjana Universitas Udayana, Jl. Mawar, Jember, Jawa Timur 68161 INDONESIA (e-mail: [ekayuliaic@gmail.com](mailto:ekayuliaic@gmail.com))

<sup>2,3</sup>Staf Pengajar Sarjana Teknik Elektro, Program Sarjana Universitas Udayana, Jl. PB. Sudirman, Denpasar, Bali 80232 INDONESIA(email: [satya.kumara@unud.ac.id](mailto:satya.kumara@unud.ac.id), [cokindra@unud.ac.id](mailto:cokindra@unud.ac.id))



digunakan sebagai bahan pembuatan batako, dan produk logam dapat di daur ulang oleh pemulung.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui kandungan bahan baku sampah mudah terbakar dengan analisis *proximate* dan *ultimate*, mengetahui potensi bahan baku sebagai *refuse-derived fuel*, mengetahui daya listrik yang dihasilkan bahan baku sampah, mengetahui tingkat emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh pembangkit listrik, serta mengetahui layak atau tidaknya pembangunan PLTSA di TPA Pakusari.

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah dapat memberikan solusi terhadap permasalahan pengelolaan sampah di lingkungan sehingga berdampak positif untuk pengurangan emisi gas rumah kaca, pemenuhan target realisasi EBT khususnya sebagai sumber energi listrik, perbaikan kualitas air dan tanah, serta meningkatkan perekonomian masyarakat sekitar TPA Pakusari.

## II. PENGOLAHAN SAMPAH TPA PAKUSARI

Pada penentuan lokasi perencanaan pengolahan sampah harus mempertimbangkan beberapa aspek, antara lain aspek fisik lokasi, aspek jalan masuk, aspek bahan bakar, aspek kelistrikan, dan aspek lingkungan, serta aspek biaya yang berkaitan dengan biaya investasi pada lokasi yang dipilih. Desa Pakusari merupakan kawasan pertanian dengan komoditas padi banyak ditemui. Jarak antara pemukiman penduduk dan sawah penduduk hanya berkisar 3 meter dengan TPA Pakusari, sehingga akses jalan beraspal yang menghubungkan TPA dengan jalan umum telah tersedia. Perencanaan diketahui bahwa luas lahan TPA Pakusari yaitu 6,8 Ha dengan total sampah yang tertampung sebanyak 133 ton/hari yang bersumber dari sampah di Kecamatan Kaliwates, Patrang, Sumpersari, Pakusari, Mayang, Silo, Kalisat, Sukowono, Sumber Jambe, Arjasa, Jelbuk, Ajung, Rambipuji, Jenggawah, dan Ambulu. Pada aspek kelistrikan, produksi listrik PLTSA ini direncanakan untuk pemenuhan target realisasi bauran energi baru terbarukan, serta pada aspek lingkungan dapat memberikan solusi terhadap dampak negatif dari timbunan sampah bagi lingkungan.

### A. Sampah Perkotaan

Sampah merupakan sisa kegiatan sehari-hari manusia dan atau proses alam yang berbentuk padat [7]. Berdasarkan standar SNI 19-3964-1994, persentase komposisi sampah dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\% \text{komponen} = \frac{\text{berat komponen}}{\text{Berat total sampah}} \times 100\% \quad (1)$$

### B. Refuse-Derived Fuel

Pengelolaan sampah menjadi *refuse-derived fuel* adalah dengan pengolahan pendahuluan (*pre-treatment*). Proses diawali dengan pemilihan sampah untuk memisahkan sampah yang bersifat magnetis dan non magnetis, pengeringan sampah secara alamiah maupun mekanik agar air yang terkandung dalam sampah menguap, dan pemotongan partikel dengan ukuran yang seragam untuk mempermudah proses pembakaran [8]. Proses *pre-treatment* sebelum dimasukkan ke proses pembakaran bertujuan agar RDF memenuhi standar kualitas bahan baku karena menghasilkan nilai kalor yang lebih tinggi [9].

### C. Gasifikasi

Gasifikasi merupakan proses oksidasi parsial melalui pembakaran suhu tinggi terhadap bahan baku yang mudah terbakar sehingga menghasilkan gas berupa hidrogen, karbon monoksida, karbon dioksida, dan metana [10]. Tahapan gasifikasi dibagi menjadi empat, antara lain pengeringan, pirolisis, oksidasi/pembakaran dan reduksi.

#### 1) Pengeringan

Proses penguapan untuk mengurangi kadar air yang terkandung dalam bahan baku MSW, dipanaskan di bawah suhu 200 °C. Panas yang digunakan diperoleh dari tahap oksidasi [11].

#### 2) Pirolisis

Proses pembakaran bahan baku kering tanpa melibatkan oksigen. Pada suhu di atas 240 °C, ikatan kimia bahan baku mulai terurai dengan cepat dan zat ringan akan keluar dari partikel menjadi kombinasi padatan, cairan dan gas [11]. Proses pirolisis dipengaruhi oleh temperatur, waktu, tekanan, dan *heat losses* [12].

#### 3) Oksidasi

Oksidasi atau pembakaran arang merupakan proses di mana tar, gas, dan arang hasil pirolisis akan teroksidasi oleh oksigen untuk menghasilkan energi termal yang digunakan untuk proses pengeringan, pirolisis, dan reduksi [13].

#### 4) Reduksi

Proses reduksi bersifat menyerap panas, proses ini terjadi pada kisaran temperatur 400 – 900 °C [12]. Pada reduksi *gas-solid reaction*, karbon padat dikonversi jadi produk gas. Pada reduksi *gas-phase reaction*, yang menentukan komposisi akhir *syngas*. Suhu tahap reduksi penentu komposisi dan karakteristik *syngas* [13].

### D. Faktor Kapasitas Pembangkit

Faktor kapasitas merupakan rasio antara energi yang disalurkan terhadap energi maksimum yang mampu diproduksi jika pembangkit dioperasikan pada kapasitas terpasangnya selama suatu periode waktu. Faktor kapasitas dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [14] :

$$\text{Faktor Kapasitas} = \frac{\text{Output energi selama T}}{\text{Daya terpasang} \times T} \quad (2)$$

### E. Specific Fuel Consumption

Konsumsi bahan bakar spesifik merupakan jumlah bahan bakar yang dikonsumsi mesin per jam untuk setiap energi yang dihasilkannya. Persamaan untuk menghitung SFC adalah sebagai berikut :

$$\text{SFC} = \frac{G_f}{N_e} \quad (3)$$

Keterangan:

SFC = *Specific fuel consumption* (kg/kWh atau liter/kWh)

G<sub>f</sub> = Konsumsi bahan bakar per jam (kg/jam atau liter/jam)

N<sub>e</sub> = Daya Efektif (Watt)

## III. LEVELIZED COST OF ENERGY

### A. Life Cycle Cost

*Life Cycle Cost* (LCC) merupakan metode ekonomi dalam mengevaluasi dan menghitung keseluruhan biaya total yang dikeluarkan, baik berulang maupun tidak berulang yang berkaitan dengan pembangunan suatu proyek atau sistem. Menurut Dhillon 2010, perhitungan LCC dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$LCC = IC + SV + NFOMC + NRC \quad (4)$$

Keterangan:

- LCC = Nilai biaya keseluruhan sistem
- IC = Nilai biaya investasi awal sistem
- SV = Biaya pemasangan sistem dan pergantian komponen
- NFOMC = Biaya operasi dan *maintenance* sistem
- NRC = Biaya lain diluar bahan bakar dan pemeliharaan

### B. Levelized Cost of Energy

*Levelized Cost of Energy* didefinisikan sebagai biaya rata-rata per kWh (Rp/kWh) energi listrik yang dihasilkan oleh sistem selama *lifetime*, dengan memperhatikan biaya investasi, penggantian, operasi dan pemeliharaan, serta biaya modal. Perhitungan LCoE dapat menggunakan persamaan sebagai berikut [15] :

$$LCoE = \sum_{t=n}^n \frac{\frac{LCC}{(1+r)^t}}{\frac{Et}{(1+r)^t}} \quad (5)$$

Keterangan:

- LCoE= Harga energi listrik (Rp/kWh)
- LCC = *Life cycle cost* keseluruhan sistem
- Et = Total pembangkitan energi listrik yang dihasilkan (kWh)
- r = Tingkat suku bunga yang berlaku (%)
- t = Umur pakai sistem (tahun)

### C. Studi Kelayakan Ekonomi

Teknik analisis ekonomi menggunakan metode *life cycle cost* untuk mengkaji biaya pembangunan suatu proyek, sehingga dapat diketahui harga tarif penjualan listrik. Analisis utama yang dilakukan yaitu terhadap *payback period* (PBP), *net present value* (NPV), *internal rate of return* (IRR), *profitability index* (PI), dan *gross benefit rasio* (*Gross B/C*).

#### 1) Payback Period

*Payback period* merupakan jangka waktu yang diperlukan perusahaan untuk menutupi modal tersebut. *Payback periode* dapat dinyatakan layak jika waktu pengembalian biaya investasi lebih kecil dari waktu proyek yang dikerjakan atau *lifetime* sistem. Persamaan untuk menghitung PBP adalah sebagai berikut :

$$PBP(t) = \frac{\text{Biaya investasi keseluruhan}}{\text{Pendapatan pertahun}} \quad (6)$$

#### 2) Net Present Value

*Net present value* merupakan metode untuk mengetahui kelayakan proyek dengan prinsip bahwa proyek layak untuk dijalankan jika jumlah keseluruhan manfaat yang diterima melebihi atau setidaknya sama dengan biaya investasi yang telah dikeluarkan (NPV ≥ 0). Adapun perhitungan NPV sebagai berikut :

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{R_t}{(1+i)^t} - C_0 \quad (7)$$

Keterangan:

- R<sub>t</sub> = Pendapatan bersih (*netto benefit*) dalam waktu t
- C<sub>0</sub> = Biaya investasi awal tahun ke 0
- i = Tingkat suku bunga acuan (%)
- t = Tahun periode (t = 0,1,2...n)

#### 3) Internal Rate of Return

*Internal rate of return* merupakan *rate of return* atas investasi *netto*. Investasi dikatakan layak apabila IRR ≥ tingkat bunga pinjaman. Persamaan untuk menghitung IRR adalah sebagai berikut :

$$IRR = i^1 + \left\{ \frac{NPV^1}{NPV^1 - NPV^2} (i^2 - i^1) \right\} \quad (8)$$

Keterangan :

- i = Tingkat suku bunga (%)
- i<sup>1</sup> = Tingkat suku bunga yang bisa menghasilkan nilai positif NPV (%)
- i<sup>2</sup> = Tingkat suku bunga yang bisa menghasilkan nilai negatif NPV (%)
- NPV<sup>1</sup> = Nilai positif *net present value*
- NPV<sup>2</sup> = Nilai negatif *net present value*

#### 4) Profitability Index

*Profitability index* adalah perbandingan antara nilai sekarang penerimaan arus kas dengan nilai sekarang pengeluaran arus kas. Proyek dinyatakan layak apabila PI ≥ 1. Persamaan untuk *profitability index* adalah sebagai berikut :

$$PI = \frac{\text{Present Value Penerimaan}}{\text{Present Value Pengeluaran}} \quad (9)$$

#### 5) Gross Benefit Rasio

Parameter *Gross B/C* merupakan nilai perbandingan antara *present value of benefits* dengan *present value of costs*.

p-ISSN:1693 – 2951; e-ISSN: 2503-2372



Proyek dinyatakan layak apabila  $gross\ B/C \geq 1$ . Persamaan untuk menghitung  $gross\ B/C$  adalah sebagai berikut :

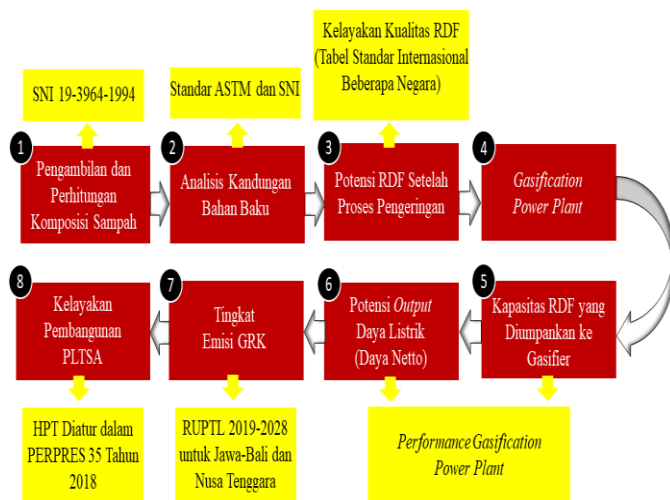
$$Gross\ B/C = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=n}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}} \quad (10)$$

Keterangan :

- $B_t$  = *Benefit* pada tahun ke -t (Rp)
- $C_t$  = *Biaya* pada tahun ke -t (Rp)
- $n$  = Lamanya periode waktu (tahun)
- $i$  = Tingkat suku bunga acuan (%)

IV. PEMBAHASAN

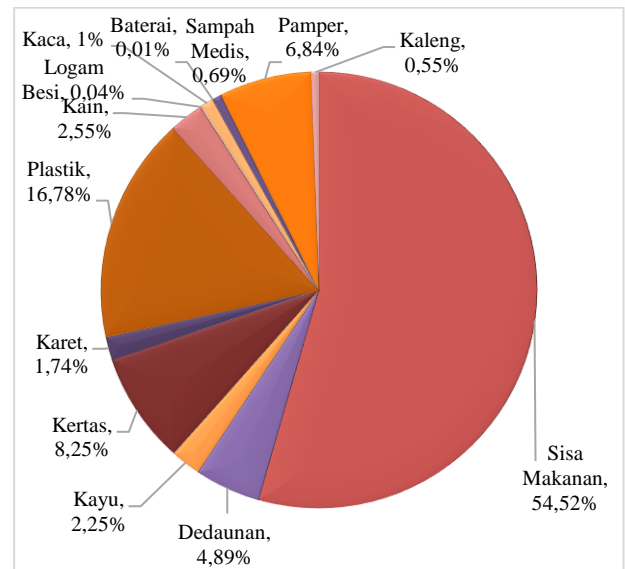
Lokasi penelitian ditentukan secara sengaja (*purposive*) karena TPA Pakusari salah satu penghasil sampah terbanyak di Kabupaten Jember. Tahapan penyelesaian permasalahan menggunakan standar acuan yang dapat dilihat pada Gambar 1:



Gambar 1: Diagram tahapan penelitian

A. Analisis Bahan Baku

Data timbulan sampah didapatkan berdasarkan kapasitas sampah yang baru dimasukkan ke TPA Pakusari, rata-rata sebesar 133.364,75 kg/hari. Timbulan sampah bersumber dari perkantoran, rumah tangga, pasar dan fasilitas umum. Pengambilan sampel dilakukan selama 8 hari berturut-turut sesuai standar SNI 19-3964-1994 dengan kapasitas sampel 100 kg/hari, dapat dilihat pada Gambar 2 menampilkan persentase komposisi timbulan sampah TPA Pakusari dengan menggunakan persamaan 1.



Gambar 2: Diagram komposisi volume sampah TPA Pakusari

Tahap selanjutnya, sampel terbaru diserahkan ke pihak laboratorium dengan persentase berat sampel sesuai komposisi timbulan sampah. Tabel 1 di bawah merupakan data hasil karakteristik kandungan bahan baku sampah mudah terbakar meliputi sisa makanan, dedaunan, kayu, kertas, karet dan plastik di TPA Pakusari.

TABEL I  
ANALISIS PROXIMATE DAN ULTIMATE BAHAN BAKU

| Analisis           | Parameter                             | Satuan  | Hasil   | Metode           |
|--------------------|---------------------------------------|---------|---------|------------------|
| Proximate Analysis | Kadar Air (*)                         | %       | 41,50   | ASTM 3302-02A    |
|                    | Volatile Solid(db)                    | %       | 59,65   | ASTM D 3175-02   |
|                    | Kadar Abu(db)                         | %       | 29,48   | ASTM D 3174-02   |
|                    | Nilai Kalor Sampah Mudah Terbakar(db) | kcal/kg | 3805,03 | ASTM 5865-02     |
| Ultimate Analysis  | Karbon(db)                            | % C     | 39,86   | ASTM D 5373-2002 |
|                    | Hidrogen(db)                          | % H     | 4,58    | ASTM D 5373-2002 |
|                    | Nitrogen(db)                          | % N     | 5,42    | ASTM D 5373-2002 |
|                    | Oksigen(db)                           | % O     | 20,58   | Balance          |
|                    | Sulfur(db)                            | % S     | 0,14    | ASTM D 4239-02A  |
|                    | Fosfor(db)                            | % P     | 0,08    | SNI 02-3776-2005 |

Berdasarkan data hasil pengujian sampel sampah di Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan, Teknik Lingkungan ITS, diketahui kadar air sampah yaitu 41,50 %, disisi lain persentase kadar air pada bahan baku yang akan dimasukkan ke dalam reaktor gasifier idealnya kurang dari 20 % (Distributor gasifier, 2022, komunikasi personal, 7 Februari), sehingga perlu dilakukan proses *pre-treatment*, seperti pemilahan, pencacahan, pengeringan bahan baku menggunakan metode *bio-drying*, dan pengayakan.

**B. Skema Teknologi PLTSA**

Berdasarkan data hasil analisis, teknologi PLTSA menggunakan gasifikasi sebagai optimalisasi pengelolaan sampah di TPA Pakusari yang terdiri dari komponen-komponen pendukung *municipal solid waste to electricity power plant* dapat dilihat pada Gambar 3.

**C. Analisis Potensi Bahan Baku Gasifikasi**

Diketahui potensi *refuse-derived fuel* TPA Pakusari setelah dilakukan proses *pre-treatment* sebesar 83.762 kg/hari. Pada penerapannya, konsumsi bahan bakar dengan kapasitas 80 ton/hari dengan *gasifier heating supply* sebesar 6.000.000 kkal/h maka *output* daya listrik sekitar 1.000 kW [16]. Diketahui efisiensi daya listrik yang dihasilkan PLTSA sebesar 20 % [16][17]. Besar *input* daya listrik sebagai berikut [18] :

$$\text{electrical efficiency} = \frac{\text{output (kW)}}{\text{Input (kW)}}$$

$$0,2 = \frac{1.000 \text{ kW}}{\text{Input (kW)}}$$

$$\text{Input} = 5.000 \text{ kW} = 4.299.250 \text{ kkal/jam}$$

Diketahui nilai NHV sampah di TPA Pakusari adalah 565,03 kkal/kg, maka kebutuhan sampah [18] :

$$\text{Kebutuhan sampah} = \frac{\text{Input (kkal/jam)}}{\text{NHV Input (kkal/kg)}}$$

$$\text{Kebutuhan sampah} = \frac{4.299.250 \text{ kkal/jam}}{565,03 \text{ kkal/kg}}$$

$$= 7.608,89 \text{ kg/jam}$$

Apabila konsumsi bahan bakar 7.608,89 kg/jam akan menghasilkan *output* listrik sebesar 1000 kW, sehingga menggunakan persamaan 3 dapat diketahui SFC sebesar 7,61 kg/kWh, maka *output* energi listrik sebagai berikut [19] :

$$\text{Potensi energi listrik (kWh)} = \frac{\text{Potensi RDF (kg)}}{\text{SFC (kg/kWh)}}$$

$$\text{Potensi energi listrik per hari} = \frac{83.762 \text{ (kg)}}{7,61 \text{ (kg/kWh)}}$$

$$= 11.006,83 \text{ kWh}$$

Diketahui potensi sampah RDF sebesar 83.762 kg akan menghasilkan daya listrik 1000,62 kW, setara dengan 1.000.621 Watt. Kapasitas energi untuk kebutuhan internal menggunakan asumsi PLTSA Benowo Surabaya dan TPST RDF Cilacap, didapatkan jumlah energi listrik netto per hari sebesar 8.428,83 kWh.

**D. Analisis Tingkat Emisi CO<sub>2</sub>**

Tingkat emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga sampah apabila kapasitas pembangkit 1.000.621 Watt dan faktor kapasitas menggunakan persamaan 2 dapat diketahui sebesar 0,2, maka perhitungan tingkat emisi GRK adalah sebagai berikut [12] :

$$\text{Energi Listrik} = 1 \text{ MW} \times 0,2 \times 11 \text{ h}$$

$$= 2,2 \text{ MWh}$$

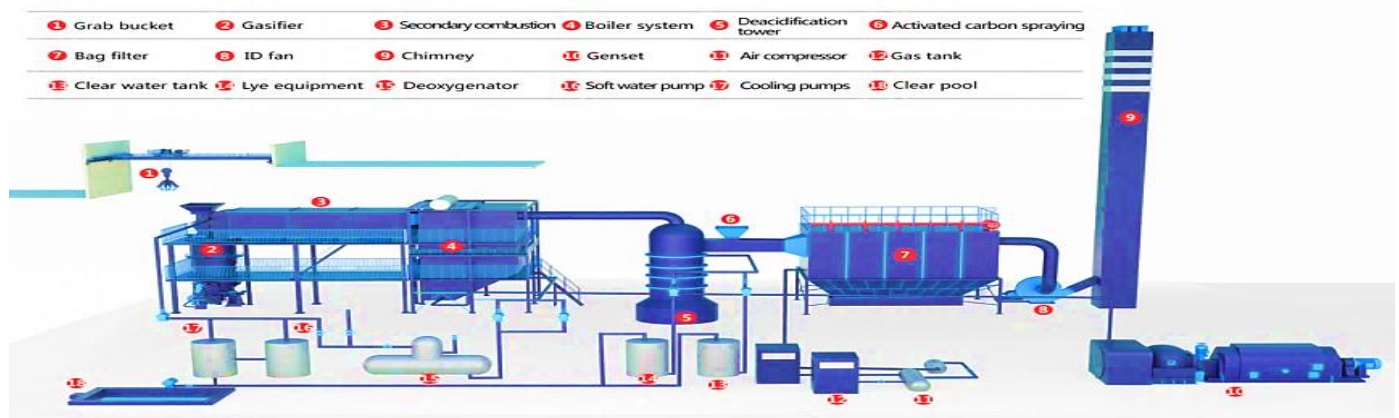
Bahwa 1 MWh = 0,817 tCO<sub>2</sub>, maka prediksi eduksi emisi selama setahun sebagai berikut :

$$2,2 \times 0,817 \times 360/\text{tahun} = 648 \text{ tCO}_2/\text{tahun}$$

Pada perencanaan pembangunan proyek PLTSA ini dilengkapi dengan unit pengelolaan pencemaran udara, salah satu bentuk komitmen Indonesia yang telah menyepakati 'the Global Methane Pledge' untuk mengurangi emisi gas metana sebesar 30% pada tahun 2030 dan target *net zero emission* pada tahun 2060, serta penerapan Perpres Nomor 35 Tahun 2018 mengenai percepatan pembangunan instalasi pengolahan sampah menjadi energi listrik berbasis teknologi ramah lingkungan.

**E. Identifikasi Biaya Proyek PLTSA**

Pada komponen pembangkit dan peralatan pra-pengolahan sampah antara satu dan lainnya dapat dikombinasikan dengan produk beberapa negara dengan memperhatikan spesifikasi kebutuhan yang diperlukan atau telah memenuhi persyaratan pembangunan infrastruktur. Detail perkiraan biaya yang diperlukan dalam pembuatan proyek PLTSA dapat dilihat pada Tabel 2, Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5, Tabel 6, dan Tabel 7.



Gambar 3: Komponen PLTSA [16]



TABEL III  
BIAYA PRA-INVESTASI

| No    | Nama Biaya            | Harga Satuan (Rp) | Jumlah | Total Harga (Rp) | Lifetime (Tahun) | Invest Cost 30 (Rp) |
|-------|-----------------------|-------------------|--------|------------------|------------------|---------------------|
| 1     | Perizinan AMDAL, dll. | 500.000.000       | 1      | 500.000.000      | 5                | 3.000.000.000       |
| Total |                       |                   |        | 500.000.000      |                  |                     |

Sumber : L. A. S. Widyaputri, 2014

TABEL IIIII  
BIAYA PEMBANGKIT

| No    | Nama Biaya       | Harga Satuan (Rp) | Jumlah | Total Harga (Rp) | Lifetime (Tahun) | Invest Cost 30 (Rp) |
|-------|------------------|-------------------|--------|------------------|------------------|---------------------|
| 1     | Pembangkit PLTSa | 36.025.000.000    | 1      | 36.025.000.000   | 30               | 36.025.000.000      |
|       | Shipping Cost    | 1.210.440.000     | 1      | 1.210.440.000    | 30               | 1.210.440.000       |
| Total |                  |                   |        | 37.235.440.000   |                  |                     |

Sumber : Distributor Gasification of Haiqi-Machine, 2022

TABEL IVV  
BIAYA TEKNOLOGI PRA-PENGOLAHAN SAMPAH

| No    | Nama Biaya         | Harga Satuan (Rp) | Jumlah | Total Harga (Rp) | Lifetime (Tahun) | Invest Cost 30 (Rp) |
|-------|--------------------|-------------------|--------|------------------|------------------|---------------------|
| 1     | Disk Screen        | 99.429.000        | 1      | 99.429.000       | 15               | 198.858.000         |
|       | Shipping Cost      | 4.323.000         | 1      | 4.323.000        | 15               | 8.646.000           |
| 2     | Bag Breaker        | 216.150.000       | 1      | 216.150.000      | 10               | 648.450.000         |
|       | Shipping Cost      | 86.460.000        | 1      | 86.460.000       | 10               | 259.380.000         |
| 3     | Magnetic Separator | 46.112.000        | 1      | 46.112.000       | 10               | 138.336.000         |
|       | Shipping Cost      | 2.161.550         | 1      | 2.161.550        | 10               | 6.484.650           |
| 4     | Conveyor           | 30.261.000        | 3      | 90.783.000       | 7,5              | 363.132.000         |
|       | Shipping Cost      | 15.130.500        | 3      | 45.391.500       | 7,5              | 181.566.000         |
| 5     | Shredding          | 322.784.000       | 1      | 322.784.000      | 12               | 806.960.000         |
|       | Shipping Cost      | 10.087.000        | 1      | 10.087.000       | 12               | 25.217.500          |
| 6     | Bio-Drying System  | 575.070.451       | 1      | 575.070.451      | 30               | 575.070.451         |
| Total |                    |                   |        | 1.498.751.500    |                  |                     |

Sumber : Distributor China, 2022 dan A. P. Economopoulos, 2009

TABEL V  
BIAYA OPERASI DAN PEMELIHARAAN

| No    | Nama Biaya                            | Harga Satuan (Rp) | Jumlah | Total Harga (Rp) | Lifetime (Tahun) | Invest Cost 30 (Rp) |
|-------|---------------------------------------|-------------------|--------|------------------|------------------|---------------------|
| 1     | O & M Pembangkit                      | 360.250.000       | 1      | 360.250.000      | 30               | 360.250.000         |
| 2     | O & M Peralatan Pendukung             | 21.557.360        | 1      | 21.557.360       | 30               | 21.557.360          |
| 3     | O & M Bio-Drying                      | 44.756.699        | 1      | 44.756.699       | 30               | 44.756.699          |
| 4     | Biaya Listrik Awal Operasi Bio-Drying | 76.223.050        | 7      | 533.561.350      | 30               | 533.561.350         |
| Total |                                       |                   |        | 960.125.409      |                  |                     |

Sumber : Diolah Pribadi, 2022, TPST RDF Cilacap, 2022, dan A. P. Economopoulos, 2009

TABEL VI  
BIAYA VARIABEL

| No    | Uraian         | Kebutuhan                                    | Harga Per Unit (Rp) | Biaya Awal Investasi (Rp) | Invest Cost 30* (Rp) |
|-------|----------------|--|---------------------|---------------------------|----------------------|
| 1     | Karbon Aktif   | 21 kg/ton x 84 ton x 30 hari x 12 bulan      | 350.000 per 25 kg   | 423.360.000               | 13.226.976.000       |
| 2     | BBM Alat Berat | 240 liter/hari x 1 unit x 30 hari x 12 bulan | 19.900              | 1.719.360                 | 89.164.800           |
| Total |                |  |                     | 425.079.360               |                      |

(\*) : Asumsi kenaikan biaya sebesar Rp. 1000/tahun

TABEL VII  
BIAYA TETAP TENAGA KERJA

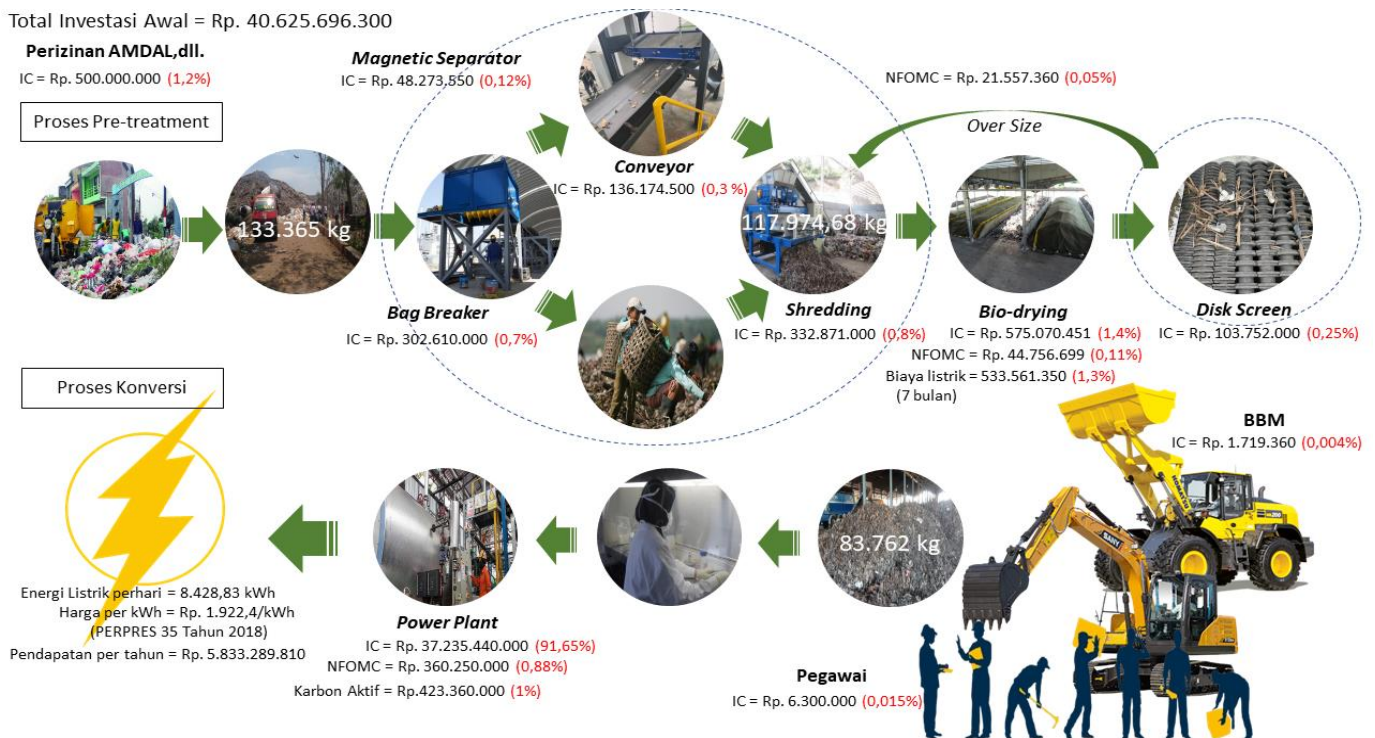
| No | Uraian Posisi     | Harga (Rp/Satuan) | Jumlah Tenaga Kerja | Rapat 1 Bulan | Total Biaya (Rp/Tahun) | Invest Cost 30 (Rp) |
|----|-------------------|-------------------|---------------------|---------------|------------------------|---------------------|
| 1  | General Manager   | 7.000.000         | 1                   | 700.000       | 84.000.000             | 2.520.000.000       |
| 2  | Asisstant Manager | 6.000.000         | 1                   | 700.000       | 72.000.000             | 2.160.000.000       |
| 3  | Supervisor        | 6.500.000         | 3                   | 2.100.000     | 234.000.000            | 7.020.000.000       |

|       |                                |           |   |           |             |               |
|-------|--------------------------------|-----------|---|-----------|-------------|---------------|
| 4     | Administrasi Keuangan dan Umum | 5.000.000 | 1 | 700.000   | 60.000.000  | 1.800.000.000 |
| 5     | Teknisi dan Operator           | 3.000.000 | 3 | 2.100.000 | 108.000.000 | 3.240.000.000 |
| 6     | Security                       | 2.500.000 | 1 | -         | 30.000.000  | 900.000.000   |
| 7     | Office Boy                     | 1.500.000 | 1 | -         | 18.000.000  | 540.000.000   |
| Total |                                |           |   | 6.300.000 |             |               |

**F. Levelized Cost of Energy (LCoE) PLTSa Pakusari**

Berdasarkan data hasil analisis dan pembahasan tekno-ekonomi dari *refuse-derived fuel* sebagai *waste to energy* di TPA Pakusari apabila terdapat 2 unit ekskavator dan 1 unit *wheel loader* yang tersedia, diketahui total investasi awal sebesar Rp. 40.625.696.300 dengan produksi energi listrik tenaga sampah sebesar 3.034.379 kWh/tahun. Nilai LCC selama 30 tahun sebesar Rp. 75.903.806.850. Tarif penjualan listrik pembangkit listrik tenaga sampah (PLTSa) dengan menggunakan persamaan 5 adalah Rp. 833,82/kWh, sehingga pendapatan yang diterima sebesar Rp. 2.530.125.730/tahun.

Persentase investasi setiap komponen dari total investasi awal dengan nominal terbesar hingga nominal terkecil yaitu pada komponen pembangkit 91,65 %, *bio-drying* 1,4 %, biaya listrik proses *bio-drying* (7 bulan) 1,3 %, perizinan AMDAL 1,2 %, karbon aktif 1 %, perawatan pembangkit 0,88 %, *shredding* 0,8 %, *bag breaker* 0,7 %, *conveyor* 0,3 %, *disk screen* 0,25 %, *magnetic separator* 0,12 %, perawatan *bio-drying* 0,11 %, perawatan peralatan pendukung 0,05 %, pegawai 0,015 %, dan BBM 0,004 %. Proses secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 4 menampilkan rangkaian tahapan pengolahan sampah menjadi energi listrik.



Gambar 4: Tekno-ekonomi RDF sebagai WTE

**1) Analisis Payback Period**

Hasil perhitungan PBP pada persamaan 6, apabila tarif penjualan listrik Rp. 833,82/kWh maka pengembalian modal investasi keseluruhan memerlukan waktu selama 30 tahun sehingga kecil kemungkinan untuk membangun kembali sistem kelistrikan yang sama. *Feed in tariff* untuk LCoE pembangkit listrik tenaga sampah (PLTSa) dikenakan harga patokan tertinggi (HPT) sebesar 13,35 cent USD/kWh atau Rp. 1.922,4 per kWh [20], sehingga pendapatan yang diterima

sebesar Rp. 5.833.289.810/tahun. Hasil perhitungan menunjukkan pengembalian modal investasi keseluruhan memerlukan waktu selama 13 atau sebelum habis masa *lifetime*.

**2) Analisis Net Present Value**

Biaya investasi awal pembangkit listrik tenaga sampah (PLTSa) yaitu sebesar Rp. 40.625.696.300 dan pendapatan pertahun dari penjualan energi yang diproduksi oleh PLTSa yaitu sebesar Rp. 5.833.289.810 dengan tingkat suku bunga dari Bank Persero sekitar 8,5 % tahun 2022, dengan



mempergunakan persamaan 7 maka parameter NPV menunjukkan hasil layak dilaksanakan.

### 3) Analisis Internal Rate of Return

Data hasil perhitungan diketahui bahwa tingkat suku bunga untuk menghasilkan nilai NPV positif sebesar Rp. 22.065.398.707 adalah 8,5 %, sedangkan tingkat suku bunga untuk menghasilkan nilai NPV negatif sebesar Rp. 2.325.930.873 adalah 15 %, dengan mempergunakan persamaan 8 maka parameter IRR menunjukkan hasil 14,35 % yang bisa diterima.

### 4) Profitability Index dan Gross Benefit Rasio

Pada perhitungan PI dan gross B/C mempergunakan persamaan 9 dan persamaan 10, menunjukkan hasil bahwa kriteria *profitability index* dan net B/C, proyek dinyatakan layak karena bernilai 2,3 atau lebih besar dari 1.

## V. SIMPULAN

Berdasarkan analisis dari hasil penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Potensi RDF dari hasil perhitungan kandungan kadar air sebelum dilakukan *treatment* sebesar 41,50 % tidak memenuhi standar sehingga harus dilakukan *pre-treatment*, kadar abu setelah dilakukan *treatment* sebesar 29,48 % tidak memenuhi standar sehingga dibutuhkan lahan untuk penyimpanan residu untuk dikelola oleh perusahaan pengolahan limbah B3, kadar volatil setelah dilakukan *treatment* sebesar 59,65 % memenuhi standar, dan perhitungan nilai kalor sampah setelah dilakukan *treatment* sebesar 3805,03 kcal/kg memenuhi standar kualitas RDF.
2. Kapasitas RDF yang sudah dilakukan *pre-treatment* sebesar 83.762 kg dengan potensi daya yang dihasilkan bahan baku sampah menggunakan teknologi gasifikasi sebesar 1.000.621 Watt.
3. Tingkat emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga sampah apabila diketahui kapasitas pembangkit 1.000.621 Watt yaitu 1,8 tCO<sub>2</sub>.
4. Hasil analisis ekonomi menunjukkan bahwa nilai LCC selama 30 tahun sebesar Rp. 75.903.806.400, dengan penjualan energi listrik sebesar Rp. 1.922,4 per kWh. Kelayakan perencanaan pembangunan PLTSA Pakusari dinyatakan layak dengan PBP selama 13 tahun, NPV dengan tingkat suku bunga 8,5 % didapatkan nilai sebesar Rp. 22.065.398.707 dan IRR sebesar 14,35 %. Pada kriteria *profitability index* dan net B/C, proyek dinyatakan layak karena bernilai 2,3 atau lebih besar dari 1.

## REFERENSI

- [1] Kompas, 2021. Bupati Jember: Jumlah Sampah 800 Ton Per Hari, yang Bisa Kami Angkut dengan Truk 300 Ton. Tersedia Pada: <https://regional.kompas.com>
- [2] Berita Jatim, 2021. Pemkab Jember Kesulitan Cari Lahan Tempat Pembuangan dan Pemrosesan Sampah, Jember. Tersedia Pada: <https://beritajati.com>
- [3] R. W. F. Dewi, M. M. S. Putra, M. S. Yudistira dan Y. Sukarmawati, "Omega cycle system solusi tepat untuk optimalisasi sistem pengelolaan sampah", *Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Teknik Lingkungan*, vol. 1, no. 1, pp.18-29. 2020.
- [4] A. E. Setyono dan N. Sinaga, "Zero waste Indonesia: peluang, tantangan, optimalisasi Waste to Energy", *Jurnal Teknik Energi*, vol. 17, no. 2, pp.116-124. 2021.
- [5] Suyitno, *Produksi gas dari padatan : dasar-dasar, teknik, simulasi, dan aplikasi*, edisi 1, UNS Press & LPP UNS ,Surakarta, 2011.
- [6] BPSDM Kementerian PU, *Panduan belajar: Teknologi Termal WtE Berbasis Gasifikasi*, BPSDM Kementerian PU, Bandung, 2018.
- [7] Undang-undang (UU) Nomor 18 Tahun 2008. Undang-undang (UU) tentang Pengelolaan Sampah. Tersedia Pada: <https://peraturan.bpk.go.id>
- [8] D. M. Novita dan E. Damanhuri, "Perhitungan nilai kalor berdasarkan komposisi dan karakteristik sampah perkotaan di Indonesia dalam konsep waste to energy", *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol.16, no.2, pp.103-114. 2010.
- [9] W. Ma, G. Hoffmann, M. Schirmer, G. Chen dan V.S. Rotter, "Chlorine characterization and thermal behavior in MSW and RDF", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 178, no. 1-3, pp.489-498. 2010.
- [10] L. Puigjaner, Ed., *Syngas from waste : emerging technologies*, Green Energy and Technology, New York, 2011.
- [11] P. J. Reddy, *Energy recovery from municipal solid waste by thermal conversion technologies, energy recovery from municipal solid waste by thermal conversion technologies*, London: Taylor & Francis Group, 2016.
- [12] M. Azmi, "Analisis teknik dan ekonomi pemanfaatan biomassa sebagai pembangkit energi listrik di Surabaya", tugas akhir S1, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia. 2014.
- [13] A. Molino, S. Chianese dan D. Musmarra, "Biomass gasification technology: The state of the art overview", *Journal of Energy Chemistry*, vol. 25, no. 1, pp. 10–25. 2016.
- [14] A. Akhdiyatul, E. Radwitya dan Y. Chandra, "Analisis teknis dan ekonomis dalam penggunaan bahan bakar biomassa di pusat listrik tenaga uap studi kasus di PLTU PT. Suka Jaya Makmur", *ELKHA*, vol. 10, no. 2, pp. 49-55. 2018.
- [15] D. Friedman, "Levelized cost of electricity renewable energy technologies", *Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems Ise*, vol. 22, no. 1, pp. 99–131. 2013.
- [16] Haiqi-Machine. Biomass Gasification Power Plant. Tersedia Pada: <http://www.haiqi-machine.com>
- [17] E. Warman, N. A. Purba dan F. Fahmi, "Planning of Garbage Power Plant (PLTSA): Case in Medan City", dipublikasikan di International Conference of Science, Technology, Engineering, Environmental and Ramification Researches (ICOSTEERR), 2018.
- [18] S. Ma'arif, R. J. Sari, dan M. Syamsiro, "Studi kelayakan ekonomi pembangunan PLTD sistem dual fuel dengan gasifikasi sekam padi kapasitas 50 kVA", *J. Mek. Sist. Termal*, vol. 1, no. 1, pp.26-31. 2016.
- [19] D. S. Primadita, "Perancangan model pengolahan sampah menjadi energi listrik sebagai solusi permasalahan sampah di Kota Denpasar", tugas akhir S1, Universitas Udayana, Badung, Indonesia. 2020.
- [20] Peraturan Presiden (PERPRES) no. 35 Tahun 2018. Percepatan Pembangunan Instalasi Pengolah Sampah Menjadi Energi Listrik Berbasis Teknologi Ramah Lingkungan. Tersedia Pada: <https://peraturan.bpk.go.id>
- [21] L. A. S. Widyaputri, "Analisis ekonomi pembangkit listrik tenaga sampah dan manfaat reduksi emisi karbon di tempat pengolahan sampah terpadu Bantargebang", tugas akhir S1, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia. 2014.
- [22] A. P. Economopoulos, 2009. "Technoeconomic aspects of alternative municipal solid wastes treatment methods", *Waste Management Journal*, Tersedia Pada: [www.elsevier.com/locate/wasteman](http://www.elsevier.com/locate/wasteman).
- [23] Badan Standardisasi Nasional, SNI 19-3964-1994 : Pengambilan dan pengukuran contoh timbulan dan komposisi sampah perkotaan, Standar Nasional Indonesia, pp. 1-16, 2019.