

## **ANALISA PRODUKSI REFUSE-DERIVED FUEL (RDF) DENGAN METODE BIODRYING DAN MEKANIKAL DARI SAMPAH MENGGUNAKAN SISTEM DINAMIS**

**Wahyu Budiyanoro<sup>1\*</sup>, A. Hadian Pratama Hamzah<sup>1</sup>, Nurhasanah<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universitas Terbuka, Jalan Cabe Raya, Pondok Cabe, Pamulang, Tangerang Selatan, Indonesia

\*e-mail: [wahyubudi722@gmail.com](mailto:wahyubudi722@gmail.com)

diterima: 12 September 2024; direvisi: 7 Oktober 2024; disetujui: 23 Oktober 2024

### **ABSTRAK**

Kabupaten Bandung tahun 2023 membangun TPST (Tempat Pengelolaan Sampah Terpadu) dengan kapasitas 75 Ton/hari dengan metode mekanikal “*One Day Process*” dan kapasitas 20 Ton/hari dengan metode biologis “*Biodrying*”. Fakta di lapangan kapasitas tersebut tidak terealisasi sesuai perencanaan. Penelitian ini untuk mengevaluasi perbedaan metode *Biodrying* dan *One Day One Process* di dalam menghasilkan RDF (*Refuse Derived Fuel*) serta menyusun model dinamis pengelolaan sampah melalui RDF yang berkelanjutan. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan sistem dinamis menggunakan *software Powersim* dengan simulasi dari tahun 2023 sampai tahun 2024. Pengelolaan eksisting dilakukan pemodelan dan analisa dengan sistem dinamis. Hasil penelitian menunjukkan metode *biodrying* lebih unggul dari kapasitas dan kualitas produk RDF serta memiliki penghematan biaya operasional untuk kebutuhan listrik. Hasil pemodelan menunjukkan kinerja pengelolaan sampah dari tahun 2023 sampai 2034 hanya sebesar 10,35 Ton/hari untuk metode *one day one process* dan 9,8 Ton/hari untuk metode *biodrying*, akibatnya sampah yang tidak terkelola mengalami peningkatan tiap tahun. Untuk memaksimalkan kapasitas maka pemerintah daerah Kabupaten Bandung perlu melakukan intervensi langkah-langkah kebijakan yang mendukung keberlanjutan TPST.

**Kata Kunci:** *One Day Process, Biodrying, Refuse Derived Fuel, Sistem Dinamis*

### **ANALYSIS OF REFUSE-DERIVED FUEL (RDF) PRODUCTION USING BIODRYING AND MECHANICAL METHODS FROM WASTE USING A DYNAMIC SYSTEM**

#### **ABSTRACT**

Bandung Regency in 2023 built a TPST (Integrated Waste Management Site) with a capacity of 75 tons/day with the mechanical method “*One Day Process*” and a capacity of 20 tons/day with the biological method “*Biodrying*”. The fact is that the capacity was not realized according to plan. This study is to evaluate the differences between the *Biodrying* and *One Day One Process* methods in producing RDF (*Refuse Derived Fuel*) and to compile a dynamic model of waste management through sustainable RDF. This study was conducted using a dynamic system using *Powersim* software with simulations from 2023 to 2024. Existing management was modeled and analyzed with a dynamic system. The results of the study showed that the *biodrying* method was superior to the capacity and quality of RDF products and had operational cost savings for electricity needs. The modeling results showed that the performance of waste management from 2023 to 2034 was only 10.35 tons/day for the *one day one process* method and 9.8 tons/day for the *biodrying* method, as a result, unmanaged waste increased every year. To maximize capacity, the Bandung Regency regional government needs to intervene with policy steps that support the sustainability of TPST.

**Keywords:** *One Day Process, Biodrying, Refuse Derived Fuel, Dynamic System*

## PENDAHULUAN

Peraturan Presiden Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategis Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga menargetkan pengurangan dan penanganan sampah pada tahun 2025 adalah 70% dan 30%. Target ini harus dicapai oleh pemerintah daerah yang memiliki kewenangan dalam pengelolaan sampah di daerahnya. Pemerintah Kabupaten Bandung tahun 2022 persentase capaian pengelolaan sampah sebesar 32,65% untuk pengurangan dan 34,39% untuk penanganan (Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional., 2023). Masih terdapat sampah tidak terkelola sebesar 32,96% serta selisih target penanganan 35,61%. Kemudian tahun 2023 kinerja pengelolaan sampah mengalami penurunan drastis disebabkan kenaikan timbulan sampah menjadi 0,47 kg/orang/hari dari 0,35 kg/orang/hari. Sehingga kinerja pengelolaan sampah di Kabupaten menjadi 32,78% untuk pengurangan dan 30,13% untuk penanganan. Hal tersebut mengakibatkan besaran sampah tidak terkelola menjadi besar yaitu 37,09% (Dinas Lingkungan Hidup Kab. Bandung, 2021). Kinerja tersebut dialami karena terdapat beberapa kendala yang ada di pemerintahan daerah Kabupaten Bandung. Kendala yang dimaksud terjadi karena kompleks dan dinamisnya sistem pengelolaan sampah. Sistem pengelolaan sampah secara besar dibagi menjadi 5 komponen sub sistem. Sub sistem tersebut yaitu sub sistem kelembagaan, pembiayaan, pengaturan, teknis operasional dan peran serta masyarakat. Di Indonesia secara umum dan khususnya di Kabupaten Bandung memang terdapat kendala-kendala subsistem tersebut yang terdiri dari kendala aspek kelembagaan, aspek pembiayaan, aspek pengaturan (hukum), aspek teknis operasional dan aspek peran serta masyarakat (Hendra, 2016).

Dalam mengurai kendala-kendala (spesifik kendala teknis operasional) tersebut Kabupaten Bandung merilis pengelolaan sampah dengan berbasis RDF (Refuse Derived Fuel). RDF adalah pengelolaan

sampah menjadikannya sebagai bahan bakar, dengan cara sampah dilakukan suatu proses hingga kadar air terkandung menurun pada tingkatan tertentu, sehingga sampah memiliki nilai kalor yang tinggi ( $\geq$  kalor batubara) serta memiliki fraksi homogen tertentu dan mudah terbakar (Hutabarat *et al.*, 2018). Produksi RDF dari sampah di Kabupaten Bandung menerapkan dua jenis metode yaitu metode *biodrying* yang berada di TPST RDF Cicukang Oxbow dan metode mekanikal atau terkenal *One Day One Process* di PUSPA Jelekong (Dinas Lingkungan Hidup Kab. Bandung, 2021). Kedua metode ini memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing dalam menghasilkan produk RDF dari segi kuantitas dan kualitasnya.

Penggunaan pengelolaan sampah berbasis RDF di Kabupaten Bandung nyatanya belum memenuhi target pengelolaan sampah 100 Ton/hari sehingga memberikan dampak masih tergantungnya Kabupaten Bandung pada pembuangan sampah di TPAS Sarimukti. Hal ini terbukti data pembuangan TPA Sarimukti tanggal 3 April 2024 mencapai 46.000 ton sampah yang berasal dari Kota Bandung, Kota Cimahi, Kabupaten Bandung dan Kabupaten Bandung Barat (Kusmayadi, 2024).

Pengelolaan sampah dengan RDF bersifat kompleks seperti pengelolaan sampah pada umumnya. Kompleksitas ini perlu diurai untuk melihat bagaimana kendala yang ada agar mendapatkan solusi yang terbaik. Salah satu analisis kebijakan untuk mengurai sistem adalah aplikasi model sistem dinamis. Sistem dinamis telah terbukti menjadi alat yang efektif untuk mempelajari perilaku dinamis dari semua proses di antara semua variabilitas yang terlibat. Sistem dinamis dapat diterapkan pada sistem dinamis apa pun, dengan waktu dan skala apa pun (Xiao *et al.*, 2020)

Sistem dinamis juga dapat memberikan analisis kebijakan pengelolaan sampah eksisting dan skenario kebijakan pengelolaan sampah di Tiongkok. Hasil penelitian yang dilakukan Duan Lu *et al.*, 2021 menunjukkan bahwa strategi pengelolaan sampah eksisting

tidak berkinerja baik dalam evaluasi Gas Rumah Kaca, energi, dan biaya, dan kapasitas TPA yang akan habis tahun 2022.

Oleh sebab itu untuk melihat bagaimana penerapan metode *biodrying* dan mekanikal dalam memproduksi RDF dari sampah di Kabupaten Bandung serta faktor apa saja yang mempengaruhinya maka dilakukan pemodelan dengan sistem dinamis. Dari pemodelan ini diharapkan dapat menjadi masukan dalam pengambilan kebijakan untuk mengoptimalkan pengelolaan sampah secara umum dan pengelolaan sampah dengan RDF yang berkelanjutan.

## BAHAN DAN METODE

Penelitian ini merupakan kombinasi antara riset eksploratori dan riset kausal yaitu kombinasi analisis data sekunder dan eksperimen. Riset eksploratori dengan analisis data sekunder untuk mengetahui situasi dan permasalahan pengelolaan sampah di Kabupaten Bandung, sedangkan riset kausal dengan eksperimen untuk mengetahui hubungan antar fenomena (Aminudin *et al.*, 2014)

Data primer yang dibutuhkan dalam melakukan pemodelan ini adalah kualitas sumber daya manusia/operator pengelola RDF serta pengelolaan sampah menjadi RDF pada fasilitas di Kabupaten Bandung. Pengambilan data akan dilaksanakan dengan metode wawancara dan observasi. Wawancara dan observasi dengan penyebaran kuesioner kepada para pegawai fasilitas RDF di Kabupaten Bandung yaitu TPST Oxbow Cicukang dan TPST Puspa Jelekong.

Penyebaran kuesioner dilakukan pada pegawai operator untuk mendapatkan kualitas sumber daya manusia/operator melalui pembobotan skor dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil Skoring Kuesioner

Skor	Nilai
0,0-3,9	Buruk
4,0-5,9	Kurang
6,0-6,9	Cukup
7,0-7,9	Baik
8,0-10,0	Sangat Baik

Selain data diatas, pengambilan data melalui wawancara dan observasi juga dimaksud untuk menghasilkan identifikasi fasilitas RDF meliputi data jam operasional, teknologi yang digunakan, kendala pengelolaan, jumlah teknologi, hingga data pemanfaatan RDF serta produk lain seperti sampah bernilai ekonomis dan pengelolaan residu sampah. Data-data tersebut dapat menggambarkan fasilitas pengelolaan RDF secara umum.

Data sekunder yang dibutuhkan dalam penelitian ini akan didapatkan dari data penelitian sebelumnya, Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Bandung, Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bandung, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat dan PT. Miskat Alam Konsultan.

Tahap pemodelan sistem dinamik dimulai dari proses pengumpulan data, pembuatan model konseptual, pembuatan model simulasi, verifikasi dan validasi, analisis dan pembahasan, serta kesimpulan dan saran.

Analisa sistem dinamik dilakukan dengan menggunakan software Powersim Studio 10 Academic. Dari simulasi model dapat ditentukan langkah-langkah kebijakan yang tepat dalam pengembangan pengelolaan sampah menjadi RDF yang berkelanjutan untuk diterapkan di Kabupaten Bandung.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

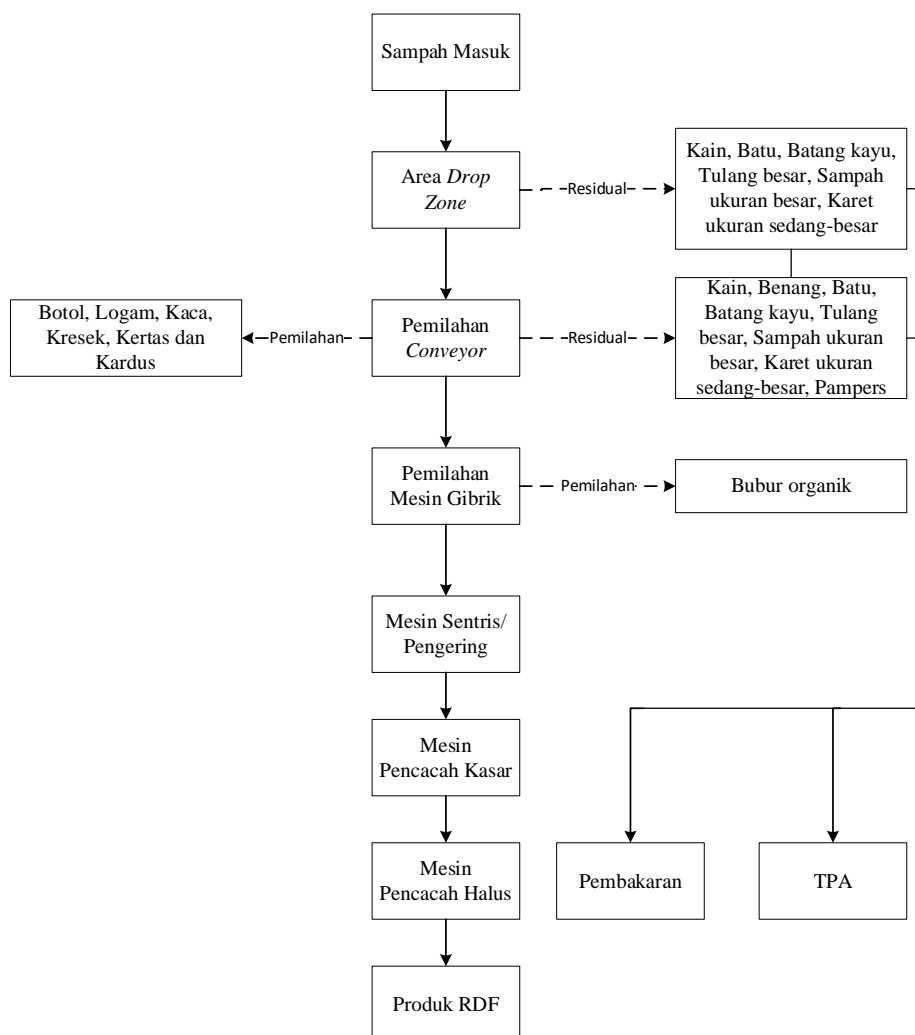
*Derived Fuel* (RDF) dengan Metode *Biodrying* dan Mekanikal dari Sampah menggunakan Sistem Dinamis (Studi Kasus : RDF Plan di Kabupaten Bandung). Demikian akan disajikan penjelasan deskripsi terkait kedua RDF Plan tersebut:

### 1. Plan RDF Tempat Pengelolaan Sampah Terpadu (TPST) Puspa Jelekong

Penerapan konsep pengolahan sampah di TPST Puspa Jelekong mengadopsi dari kearifan lokal yang mengacu pada proses dimana sampah yang sudah tidak dapat dimanfaatkan untuk dijadikan bahan sumber energi dengan memanfaatkan gaya fisika dalam menghasilkan produknya. TPS Puspa Jelekong berada di Kelurahan Jelekong Kecamatan Baleendah Kabupaten Bandung.

Lokasi TPST berada pada titik koordinat 7° 1'42.37"LS: 107°39'54.61"LT.

TPST Puspa Jelekong memiliki kapasitas perencanaan 75 Ton/hari dengan produk hasil olahan yaitu RDF (*Refuse Derived Fuel*). Dalam menghasilkan RDF di TPST Puspa Jelekong menggunakan metode pengeringan secara mekanikal yaitu menggunakan mesin sentris dan pemilahan otomatis dengan mesin pemilah gibrik yang dinamakan *One Day One Process*. Alur pengelolaan TPST Puspa Jelekong dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Proses Pengelolaan Sampah TPST Puspa Jelekong

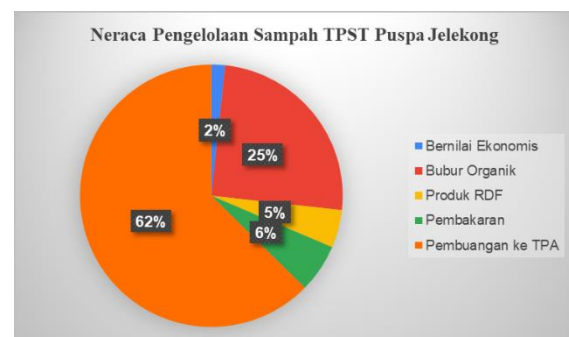
Uraian diagram proses pengelolaan sampah TPST Puspa Jelekong:

- a. Pengelolaan sampah yang tercampur yang berasal dari kegiatan domestik seperti rumah tangga, pasar dan pertokoan masuk ke area *drop zone*. Area ini memiliki

fungsi untuk mengurai sampah ke area mesin pemilah *conveyor* dengan spesifik sampah harus dibongkar dari bungkus-bungkus, membagi sampah secara proporsional antara 3 *line*, memilah sampah tahap awal yaitu kain, batu, batang

- kayu, tulang besar, sampah ukuran besar, dan karet ukuran sedang-besar. Dalam memasukan sampah ke area pemilahan diupayakan disebar dengan tipis.
- b. Tahapan pemilahan pada mesin *conveyor*, pemilahan ini dilakukan dengan tenaga manusia untuk memilah sampah yang memiliki nilai ekonomi (*Botol, Logam, Kaca, Kresek, Kertas dan Kardus*) dan memilah sampah yang dianggap akan mengganggu proses mesin selanjutnya (kain, benang, batu, batang kayu, tulang besar, sampah ukuran besar, karet ukuran sedang-besar, pampers).
  - c. Tahapan pemilahan dengan mesin Gibrig. Mesin gibrig bekerja memilah sampah secara umum membaginya menjadi produk an-organik seperti plastik kresek dan bubur organik. Pemilahan dilakukan memanfaatkan massa jenis bahan sehingga bahan yang cukup berat akan jatuh dan bahan ringan akan terbang dikeluarkan melalui mesin.
  - d. Tahapan pengeringan sampah dengan mesin sentris. Tahapan ini bertujuan untuk mengeringkan/menghilangkan sisa air yang menempel pada lembaran-lembaran sampah sehingga kadar air berkurang. Prinsip pengelolaan sampah mesin sentris yaitu memanfaatkan gaya sentrifugal dan gaya gravitasi (Rohman, K. N., 2021)
  - e. Tahapan pencacah kasar menggunakan mesin pencacah kasar. Penggunaan mesin pencacah kasar yang dikenal *shreeder* sebenarnya berfungsi untuk menyeragamkan ukuran sampah sesuai dengan panjang dan radius mata pisau yang digunakan. Tujuan pencacahan ini ingin mendapatkan ukuran 5 cm dari hasil cacahan.
  - f. Tahapan pencacah halus menggunakan mesin pencacah halus yang disebut *crusher*. Mesin ini dilengkapi dengan saringan yang ukurannya disesuaikan dengan permintaan dari calon pembeli RDF. Hasil olahan ini merupakan produk RDF/Biomassa yang dapat dimanfaatkan oleh industry sebagai bahan pengganti batubara. Ukuran hasil pencacahan ini memiliki ukuran 1 cm = 0,5 cm.

Dalam rangkaian proses pengelolaan sampah TPST Puspa Jelekong hasil produk memiliki manfaat masing-masing sesuai kebutuhan pasar, seperti produk bernilai ekonomis langsung disalurkan ke pengepul untuk dimanfaatkan oleh industri daur ulang. Produk RDF yang merupakan produk utama dijadikan bahan substitusi batubara dengan bahan biomassa pada rasio tertentu (*Co-Firing*). Kemudian terkait residu hasil pemilahan dilakukan pemusnahan menggunakan sistem pembakaran dan atau dilakukan pemrosesan akhir di TPAS Sarimukti. Namun masih ditemukan adanya kendala terkait pengelolaan bubur organik di TPST Puspa Jelekong yang berasal dari proses pemilahan mesin gibrig yang masih dilakukan pembuangan terbuka pada lahan yang berlubang. Neraca pengelolaan sampah di TPST Puspa Jelekong dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Neraca Pengelolaan Sampah TPST Puspa Jelekong

Terlihat dari Gambar 2 menunjukkan kapasitas pengelolaan TPST Puspa Jelekong 37,4% untuk mengelola sampah dan sisanya 62% menjadi residu yang dibuang ke TPA. TPST Puspa Jelekong dalam menghasilkan produk RDF sekitar 5%. Produk RDF ini tidak bisa langsung dimanfaatkan untuk proses substitusi memerlukan perlakuan kembali yaitu menambahkan sampah organik kering agar nilai kalor bertambah. Hasil uji nilai kalor dan produk RDF keluaran dari mesin pencacah halus dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Uji Nilai Kalor Produk RDF TPST Puspa Jelekong

Analisa	Parameter	Satuan	Basis	Nilai
Proximat	Kadar Air	%	adb	9,2
	Kadar Zat			
	Terbang	%	adb	24,4
	Kadar Abu	%	adb	58,5
	Karbon Tertambat	%	adb	7,5
	Nilai Kalor	cal/gr	adb	2243,2

Sumber: Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bandung, 2023

Catatan: Hasil Uji merupakan perlakuan penambahan bahan organik keras dengan perbandingan 1:1



**Gambar 3.** Produk RDF TPST Puspa Jelekong

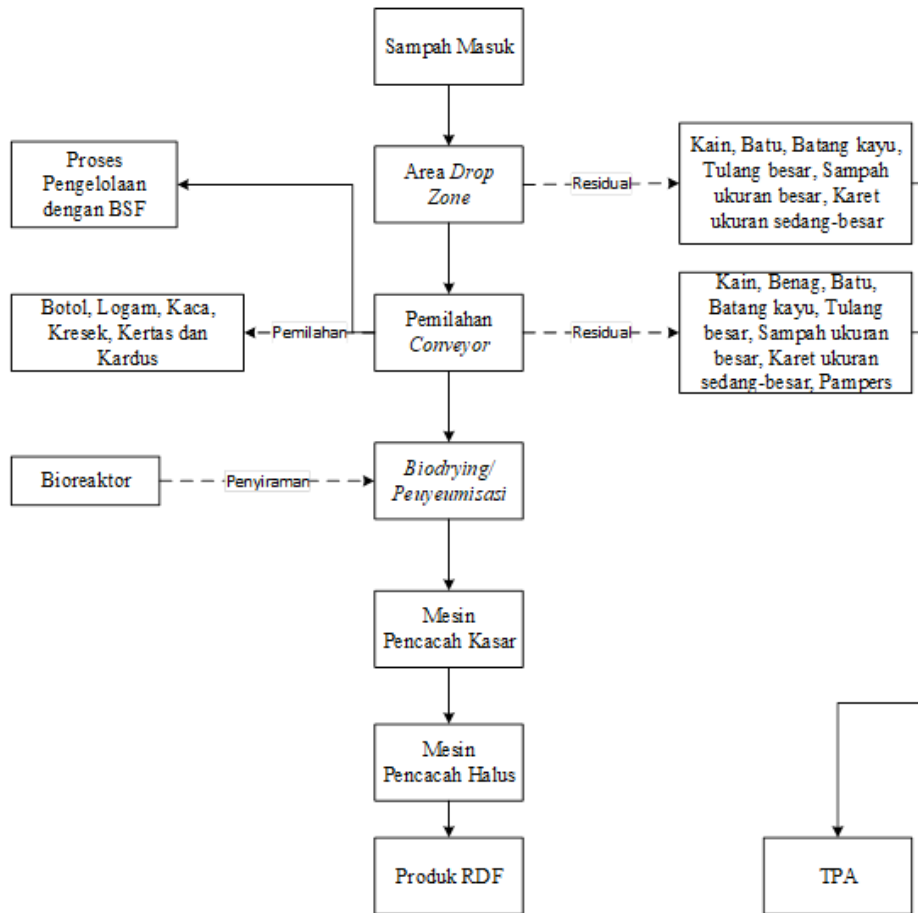
Pada Gambar 3 produk RDF dari keluaran mesin pencacah halus yang memiliki ukuran 1 cm -0,5 cm dengan kadar air  $\pm$  9%.

## 2. Plan RDF Tempat Pengelolaan Sampah Terpadu (TPST) Cicukang Oxbow

Penerapan konsep pengolahan sampah di TPST Cicukang Oxbow mengadopsi dari kearifan lokal yang mengacu pada proses dimana sampah yang sudah tidak dapat dimanfaatkan untuk dijadikan bahan sumber energi dengan memanfaatkan proses biologis dalam menghasilkan produknya. TPS

Cicukang Oxbow berada di Desa Mekarrahayu Kecamatan Margaasih Kabupaten Bandung. Lokasi TPST berada pada titik koordinat 6°58'58.87"LS: 107°33'29.15"LT.

TPST Cicukang Oxbow memiliki kapasitas perencanaan 20 Ton/hari dengan produk hasil olahan yaitu RDF (*Refuse Derived Fuel*). Dalam menghasilkan RDF di TPST Puspa Jelekong menggunakan metode pengeringan secara biologis yaitu *Biodrying*. *Biodrying* yaitu metode pengurangan kadar air memanfaatkan proses biologis melalui dekomposisi secara aerobik. *Biodrying* merupakan proses pengolahan *mechanical-biological treatment* (MBT). Teknik pengeringan sampah ini bergantung pada aktivitas biologi dari mikroorganisme (bakteri dan fungi) untuk mengurangi kadar air dengan meningkatkan nilai kalor (meningkat berkisar 30-40%) sampah dengan kadar air yang tinggi dapat ditransformasikan menjadi bahan bakar padat yang dapat digunakan di masa yang akan datang (Chaerul & Wardhani, 2020). Alur pengelolaan TPST Puspa Jelekong dapat dilihat pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Diagram Proses Pengelolaan Sampah TPST Cicung Oxbow

Uraian diagram proses pengelolaan sampah TPST Puspa Jelekong:

- a. Pengelolaan sampah yang tercampur yang berasal dari kegiatan domestik seperti rumah tangga, pasar dan pertokoan masuk ke *area drop zone*. Area ini memiliki fungsi untuk mengurai sampah ke area mesin pemilah *conveyor* dengan spesifik sampah harus dibongkar dari bungkusan-bungkusan, membagi sampah secara proporsional antara line, memilah sampah tahap awal yaitu kain, batu, batang kayu, tulang besar, sampah ukuran besar, dan karet ukuran sedang-besar. Dalam memasukan sampah ke area pemilahan diupayakan disebar dengan tipis.
- b. Tahapan pemilahan pada mesin *conveyor*, pemilahan ini dilakukan dengan tenaga manusia untuk memilah sampah yang memiliki nilai ekonomi (*Botol, Logam, Kaca, Kresek, Kertas dan Kardus*) dan memilah sampah yang dianggap akan mengganggu proses mesin selanjutnya

- (kain, benang, batu, batang kayu, tulang besar, sampah ukuran besar, karet ukuran sedang-besar, pampers). Pada tahap ini juga terdapat pemilahan organik yang dimanfaatkan untuk pengelolaan organik dengan BSF atau Bahasa panjangnya *Budidaya Lalat Black Soldier Fly*.
- c. Tahapan proses pengeringan dengan *Biodrying*. Pada proses ini bertujuan untuk menurunkan kadar air yang berada dalam sampah. proses ini memanfaatkan mikroorganisme untuk menurunkan kadar air. Untuk memperkaya dan mempercepat proses maka ditambah bioaktivator. Bioaktivator yang digunakan saat ini setelah proses perbaikan adalah SCC-Probiotic dengan pengenceran 1:30 untuk memproses 1ton sampah masuk. Dengan penggunaan bioaktivator baru ini mampu menghasilkan parameter *biodrying* yang sangat baik (Sucipto, 2020).
- d. Tahapan pencacah kasar menggunakan mesin pencacah kasar. Penggunaan mesin

pencacah kasar yang dikenal *shreeder* sebenarnya berfungsi untuk menyeragamkan ukuran sampah sesuai dengan panjang dan radius mata pisau yang digunakan. Tujuan pencacahan ini ingin mendapatkan ukuran 5 cm dari hasil cacahan.

- e. Tahapan pencacah halus menggunakan mesin pencacah halus yang disebut *crusher*. Mesin ini dilengkapi dengan saringan yang ukurannya disesuaikan dengan permintaan dari calon pembeli RDF. Hasil olahan ini merupakan produk RDF/Biomassa yang dapat dimanfaatkan oleh industri sebagai bahan pengganti batubara. Ukuran hasil pencacahan ini memiliki ukuran 1 cm = 0,5 cm.

Dalam rangkaian proses pengelolaan sampah TPST Cicukang *Oxbow* hasil produk memiliki manfaat masing-masing sesuai kebutuhan pasar, seperti produk bernilai ekonomis langsung disalurkan ke pengepul untuk dimanfaatkan oleh industri daur ulang seperti TPST Puspa Jelekong. Produk RDF yang merupakan produk utama dijadikan bahan substitusi batubara dengan bahan biomassa pada rasio tertentu (*Co-Firing*). Kemudian terkait residu hasil pemilahan dilakukan pemrosesan akhir yang dikirim ke TPAS Sarimukti. Pada TPST ini tidak memiliki alat pembakar sampah seperti halnya di TPST Puspa Jelekong. Demikian akan disajikan neraca pengelolaan sampah di TPST Cicukang *Oxbow*:



Gambar 5. Neraca Pengelolaan Sampah TPST Cicukang *Oxbow*

Terlihat pada Gambar 5 pengelolaan sampah di TPST Cicukang *Oxbow* tampak residual hanya 6% dari sampah masuk. Sampah sebagian besar menjadi produk RDF pada area *biodrying*. Namun produk ini masih dalam bentuk bahan belum menjadi bentuk cacahan. Kondisi di lapangan bahan ini terkendala karena kapasitas mesin pencacah baik mesin pencacah kasar maupun halus yang tidak beroperasi dengan bagus. Maka jika terus menerus menumpuk akan menjadi sebuah residual jika tidak dapat dicacah.

Produk RDF TPST Cicukang *Oxbow* dengan metode pengeringan menggunakan *biodrying* dapat digunakan oleh industry yang memerlukan sebagai bahan substitusi atau sebagai bahan *Co-Firing*. Dalam uji kalor tampaknya nilai kalor cukup besar karena bahan organik pada sampah tidak dilakukan pemilahan sehingga menambah nilai kalor biomassa/RDF pada produk TPST Cicukang *Oxbow*. Hasil uji kalor dari biomassa/RDF TPST Cicukang *Oxbow* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Uji Nilai Kalor Produk RDF TPST Cicukang *Oxbow*

Analisa	Parameter	Satuan	Basis	Nilai
Proximat	Kadar Air	%	adb	8,1
	Kadar Zat Terbang	%	adb	51,7
	Kadar Abu	%	adb	12,4
	Karbon Tertambat	%	adb	0,9
	Nilai Kalor	cal/gr	adb	4009,64

Sumber: Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bandung, 2023





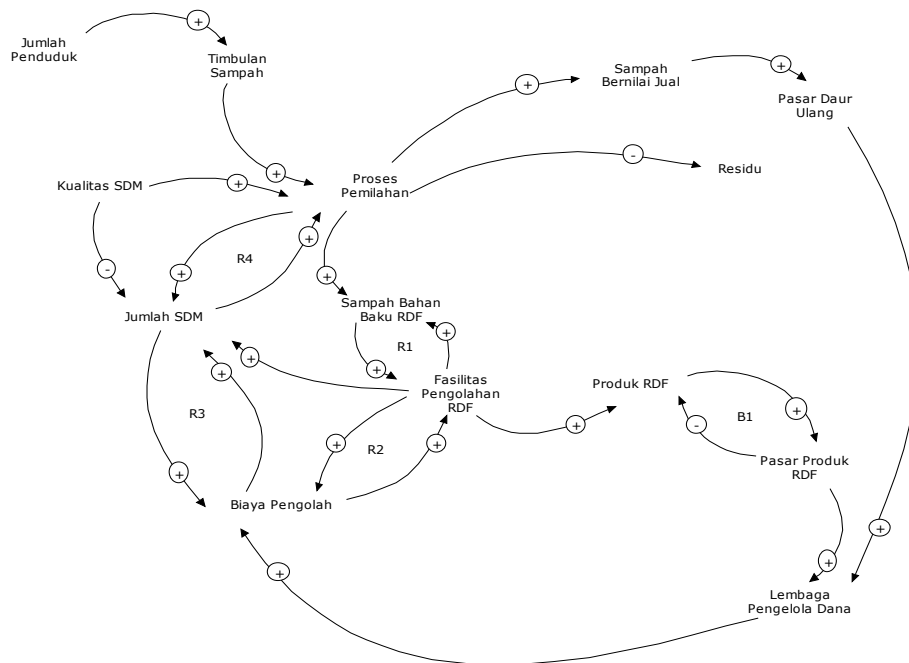
**Gambar 6.** Produk RDF TPST Cicukang Oxbow

Pada Gambar 6 merupakan produk RDF dari keluaran mesin pencacah halus yang memiliki ukuran 1 cm -0,5 cm dengan kadar air  $\pm 8\%$ .

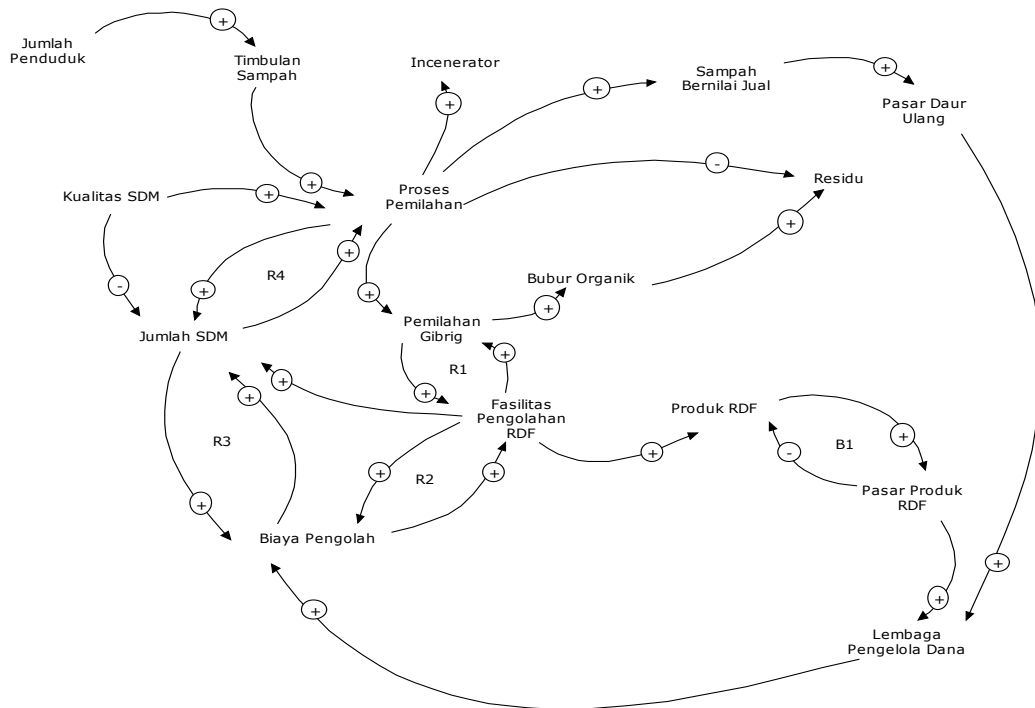
### 3. Pengembangan Model

Tahap ini dimulai dengan identifikasi variabel dari sistem pengelolaan sampah sesuai dengan batasan sistem yang telah ditentukan. Tujuan identifikasi ini untuk memperdalam informasi dari pengelolaan sampah dengan RDF di Kabupaten Bandung yang meliputi berasal dari variabel timbulan sampah, pengurangan sampah di sumber, pengangkutan sampah, pengolahan sampah di TPST RDF/Fasilitas RDF dan pembiayaan sampah. Setelah variabel berhasil

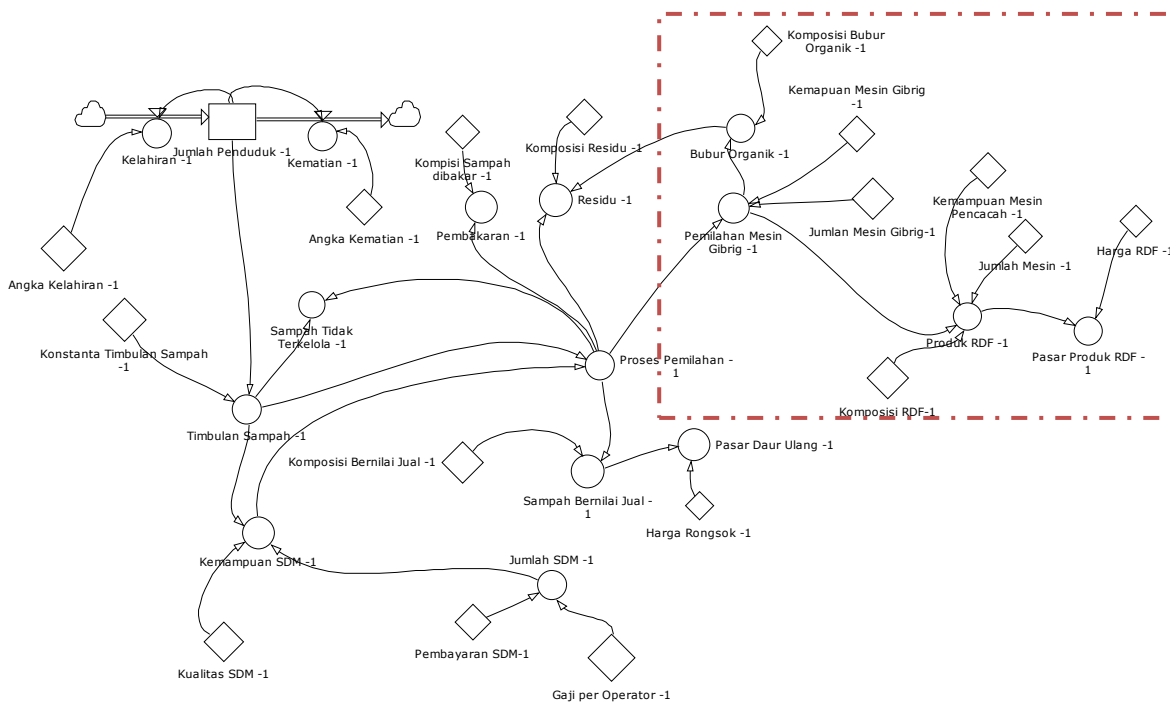
teridentifikasi, kemudian dilanjutkan dengan proses pembuatan diagram input dan output. Input dibedakan menjadi input terkendali dan tidak terkendali. Output dibedakan menjadi output yang diharapkan dan tidak diharapkan. Kemudian, dilakukan pembuatan model *causal loop diagram* dari semua aspek yang akan diamati. Model ini akan menggambarkan hubungan sebab akibat antar aspek yang diamati. *Casual Loop diagram* TPST Cicukang Oxbow dengan proses Biodrying dapat dilihat pada Gambar 7. *Causal Loop Diagram* TPST PUSPA Jelekong dengan Proses *One Day One Proses* dapat dilihat pada Gambar 8. Pemodelan dengan sistem dinamis pada kegiatan pengelolaan sampah menggunakan fasilitas RDF. Pada Gambar 8 menunjukkan prediksi kinerja TPST dengan produk RDF tiap tahun. Pada hasil simulasi juga menunjukkan bagaimana produk pengelolaan pada fasilitas TPST menjadi salah satu kontribusi pembiayaan. *Stock And Flow Diagram* Pengelolaan Sampah menjadi RDF pada Fasilitas TPST dapat dilihat pada Gambar 9.



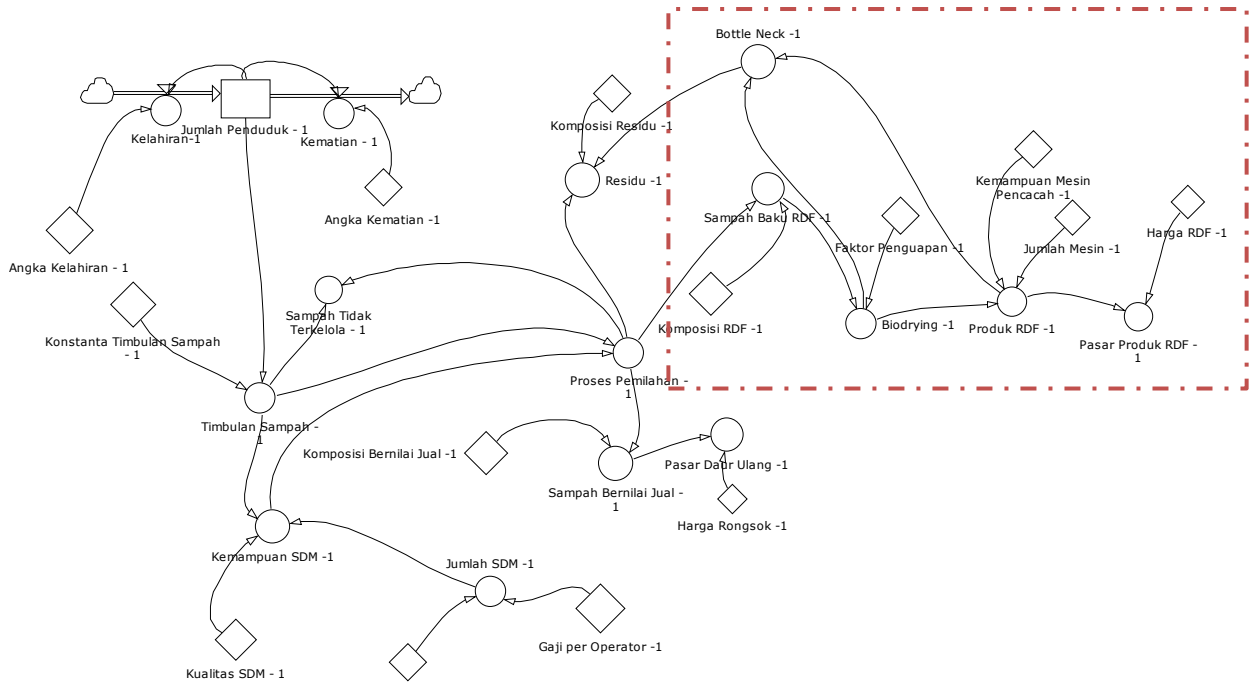
**Gambar 7.** *Causal Loop Diagram* TPST Cicukang Oxbow dengan Proses *Biodrying*



**Gambar 8.** Causal Loop Diagram TPST PUSPA Jelekong dengan Proses *One Day One Proses*



**(A)** Proses Pengolahan menggunakan “*One Day One Process*”

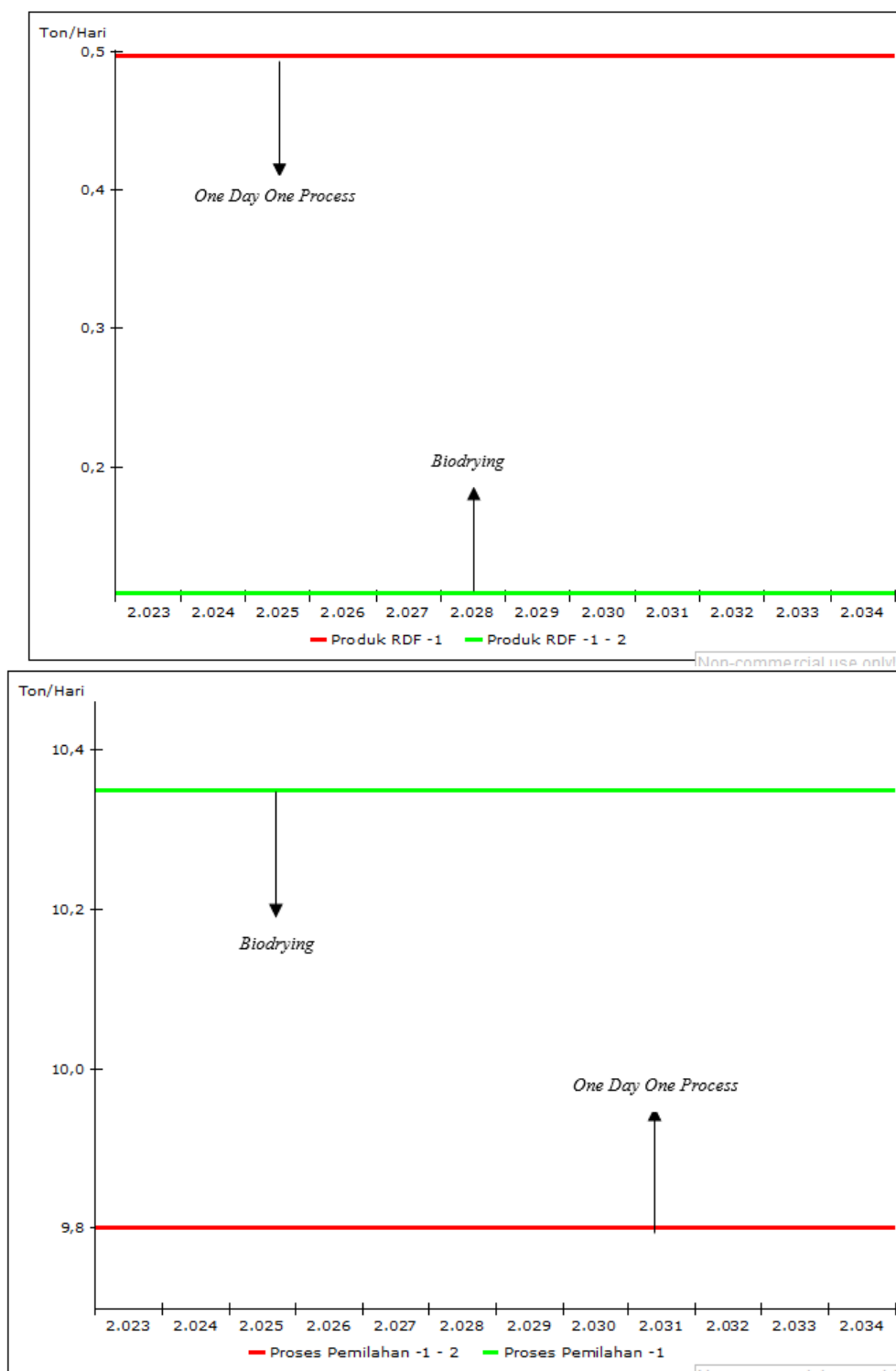


(B) Proses Pengolahan menggunakan “*Biodriying*”

**Gambar 9.** *Stock And Flow* Diagram Pengelolaan Sampah menjadi RDF pada Fasilitas TPST

Pada model *Stock and Flow* (SFD) pengelolaan sampah menjadi RDF pada fasilitas pengelolaan sampah di TPST Kabupaten Bandung perbedaan antara metode pengeringan mekanikal (“*One Day One Process*”) dengan metode biologi (“*Biodriying*”) terletak pada perlakuan sampah setelah pada tahap proses pemilahan. Proses pengeringan mekanikal dilakukan dengan tahapan lanjutan pemisahan komponen organik dan an-organik dengan bantuan mesin pemilahan (gibrig) kemudian dikeringkan dengan mesin dan langsung dicacah. Adapun untuk metode biologis sampah setelah dipilah langsung masuk proses pengeringan menggunakan metode biologis dan sampah langsung dicacah.

Dari pemodelan SF akan didapat perilaku pengelolaan sampah menjadi RDF dari kedua metode diatas. Perilaku ini dilihat bagaimana proses tersebut jika berjalan dari tahun ke tahun ke depannya. Grafik hasil dari SFD pengelolaan sampah menjadi RDF dapat dilihat pada Gambar 10. Grafik pada Gambar 10 terlihat perilaku proses pemilahan sampah (yang menunjukkan kapasitas pengelolaan eksisting) dari tahun ketahun akan sama atau stagnan pada angka 9,8 Ton/hari untuk proses “*One Day One Process*” dan 10,4 Ton/hari untuk proses “*Biodriying*”. Demikian pula untuk produk RDF 0,5 Ton/hari “*One Day One Process*” dan 0,1 Ton/hari untuk “*Biodriying*”.



**Gambar 10.** Grafik Kapasitas Produk RDF dan Kapasitas Proses Pemilahan  
 Keterangan: Kode (-1) adalah proses “One Day One Process” Kode (-1-2) adalah proses “Biodrying”

**4. Validasi Model**

Validasi visual dan statistik pada model diperlukan untuk melihat apakah model sudah mirip dengan kenyataannya. Model yang di validasi adalah model pertumbuhan penduduk yang mempengaruhi model

timbulan sampah dan mempengaruhi input sampah yang dipilah/dikelola pada fasilitas TPST. Proses validasi secara visual dan statistik akan ditampilkan pada Tabel 4 dan Gambar 11.

Tabel 4. Validasi Statistik

Tahun	Margaasih (Simulasi)	Baleendah (Simulasi)	Margaasih (Refrensi)	Baleendah (Refrensi)
2014	151.890	270.306	152.598	250.771
2015	153.211	272.658	177.825	232.499
2016	154.544	275.030	156.748	243.050
2017	155.889	277.423	156.817	245.154
2018	157.245	279.836	144.914	251.534
2019	158.613	282.271	145.576	254.569
2020	159.993	284.726	146.477	255.949
2021	161.385	287.204	148.137	260.090
2022	162.789	289.702	150.374	265.873
2023	164.205	292.223	151.365	270.306
Rata-Rata	157.977	281.138	153.083	252.980
AME	3,1%	10,0%		

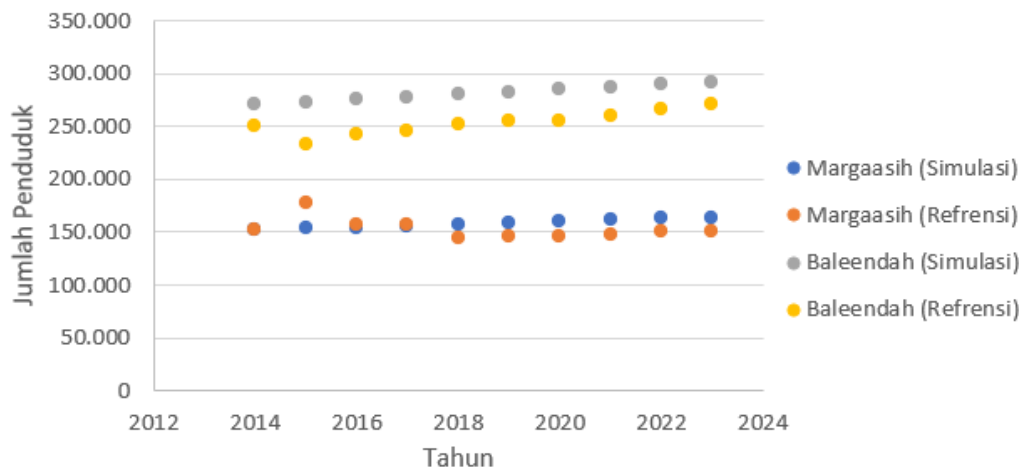
Tahap validasi model dengan menggunakan *Absolute Mean Error* (AME) dengan membandingkan kinerja keluaran model dengan data aktual. Prosedur pengujian konsistensi menggunakan dua langkah, pertama dengan mengeluarkan *output* simulasi kemudian membandingkannya dengan pola perilaku data empiris visual. Selanjutnya, jika ada ketidaksesuaian, variabel dan parameter model akan diperbaiki berdasarkan investigasi penyebab ketidakbenaran tersebut. Kedua, keluaran simulasi yang sesuai dengan pola data aktual diuji secara statistik dengan menggunakan *Absolute Means Error* (AME) untuk memvalidasi hasilnya. *Absolute Means Error* (AME) merupakan penyimpangan antara nilai rata-rata simulasi dengan nilai sebenarnya. Batas penyimpangan yang dapat diterima adalah antara 5–10%. Jika  $AME < 5-10\%$ , model dapat diklasifikasikan valid dan jika  $AME >$

10%, model harus dievaluasi (Zulfikar *et al.*, 2023).

$$AME = \frac{\text{Rata - rata simulasi}}{\text{Rata - rata refrensi}} \times 100\%$$

Pada Tabel 4 menunjukkan hasil AME  $< 10\%$ , ini mempresentasikan berarti model diklasifikasikan valid. Model pertumbuhan penduduk yang mempengaruhi jumlah timbulan sampah serta model timbulan sampah yang dikelola oleh pemerintah daerah dapat dinyatakan valid atau menyerupai kondisi aslinya.

Kemudian validasi dilanjutkan dengan validasi visual. Validasi visual dilihat bagaimana perilaku data model dengan perilaku data referensi memiliki perilaku yang sama sehingga model dapat disimpulkan valid. Demikian disajikan validasi visual.



Gambar 11. Grafik Pertumbuhan Penduduk Data Simulasi dan Referensi

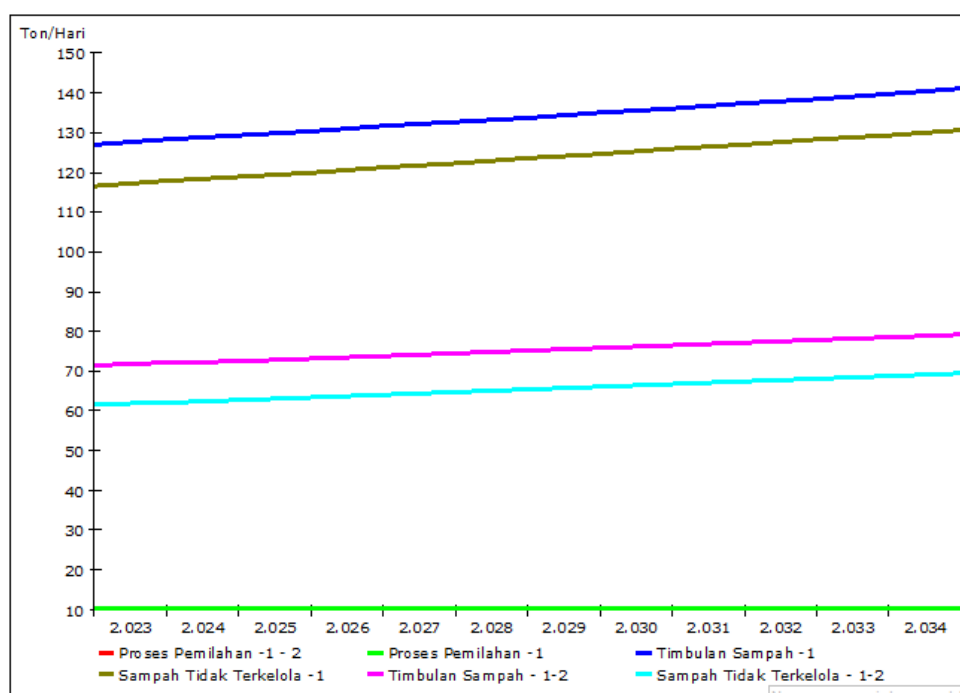
Gambar 11 menunjukkan simulasi dan kenyataan jumlah penduduk menunjukkan memiliki perilaku grafik yang terbentuk adalah *exponential growth*, artinya dari model tersebut setiap tahun akan bertambah terus baik jumlah penduduk dan mempengaruhi jumlah tonase sampah.

Dari validasi teori, statistika, dan visual menunjukkan model memiliki karakteristik sama dengan data asli, sehingga disimpulkan model dapat menggambarkan keadaan nyatanya. Model yang telah dibuat dapat dilakukan simulasi dan intervensi

untuk menganalisa kebijakan yang dapat memaksimalkan sistem pengelolaan sampah.

### 5. Simulasi Eksisting

Pengelolaan sampah menjadi produk RDF sudah berjalan di Kabupaten Bandung. Simulasi eksisting ingin melihat bagaimana kinerja pengelolaan sampah dari segi kapasitas dilihat dari proses pemilahan, sampah yang terkelola di wilayah layanan, residu yang dihasilkan, dan nilai ekonomi hasil produk pengelolaan. Demikian disajikan grafik simulasi:



Gambar 12. Grafik Simulasi Kinerja Pengelolaan Eksisting

Keterangan: Kode (-1) adalah proses “One Day One Process” Kode (-1-2) adalah proses “Biodrying

Pengelolaan sampah eksisting menunjukkan tidak mampu menghasilkan kinerja sesuai kapasitas desain TPST yaitu 20 Ton/hari untuk TPST Cicukang dan 75 Ton/hari untuk TPST Puspa Jelekong. Kapasitas pengelolaan tahun ke depan tidak mengalami perubahan sedangkan timbulan sampah dan sampah tidak terkelola terus mengalami penambahan seiring bertambahnya jumlah penduduk setiap tahun.

Di sisi lain dari pengelolaan sampah yang menghasilkan produk baik produk residu yang perlu biaya untuk pengelolaannya, produk bernilai ekonomis dari hasil pemilahan daur ulang dan produk RDF memiliki nilai ekonomi. Nilai ekonomi namun sayangnya pengelolaan eksisting dalam arti kelembagaan yang ada tidak dapat mengelolanya. Demikian disajikan nilai ekonomis produk:

**Tabel 5.** Nilai Ekonomis Produk Pengelolaan Eksisting

Tahun	Pasar Daur Ulang-1 (/Hari)	Pasar Produk RDF-1 (/Hari)	Pasar Daur Ulang-1-2 (/Hari)	Pasar Produk RDF-1-2 (/Hari)
2023	Rp 569.250,00	Rp 347.412,24	Rp 539.000,00	Rp 76.012,23
2024	Rp 569.250,00	Rp 347.412,24	Rp 539.000,00	Rp 76.012,23
2025	Rp 569.250,00	Rp 347.412,24	Rp 539.000,00	Rp 76.012,23
2026	Rp 569.250,00	Rp 347.412,24	Rp 539.000,00	Rp 76.012,23
2027	Rp 569.250,00	Rp 347.412,24	Rp 539.000,00	Rp 76.012,23
2028	Rp 569.250,00	Rp 347.412,24	Rp 539.000,00	Rp 76.012,23
2029	Rp 569.250,00	Rp 347.412,24	Rp 539.000,00	Rp 76.012,23
2030	Rp 569.250,00	Rp 347.412,24	Rp 539.000,00	Rp 76.012,23
2031	Rp 569.250,00	Rp 347.412,24	Rp 539.000,00	Rp 76.012,23
2032	Rp 569.250,00	Rp 347.412,24	Rp 539.000,00	Rp 76.012,23
2033	Rp 569.250,00	Rp 347.412,24	Rp 539.000,00	Rp 76.012,23
2034	Rp 569.250,00	Rp 347.412,24	Rp 539.000,00	Rp 76.012,23

Keterangan: Kode (-1) adalah proses “*One Day One Process*” Kode (-1-2) adalah proses “*Biodrying*”

Dalam simulasi potensi nilai ekonomis yang didapat dari proses pengelolaan sampah TPST Puspa Jelekong adalah Rp 916.662,24 per hari dan TPST Cicukang *Oxbow* Rp. 615.012,23 per hari.

**5. Diskusi**

Evaluasi pengelolaan dengan dua metode ini terlihat penggunaan energi listrik cukup besar pada metode mekanikal karena konsumsi energi listrik dari pengoperasian alat. Pada Gambar 9 menunjukkan perbedaan antara kedua metode. Secara umum proses *input-output* memiliki kesamaan yaitu proses pengelolaan sampah menjadi RDF dengan proses pengeringan. Namun metode pengeringan ini yang menjadi titik perbedaan pada kedua metode. Metode mekanikal akhirnya membutuhkan energi listrik yang cukup besar karena sebagai proses utama dalam pembentukan RDF. Metode mekanikal memiliki kendala juga pada tahap

penyiapan bahan untuk dicacah. Mesin pemilahan (*gibrig*) memiliki andil utama dalam menentukan kapasitas pengelolaan. Hasil pada Gambar 10 menunjukkan kapasitas stagnan hanya dapat mengelola 9,8 ton/hari. Pemodelan juga menunjukkan tahun-tahun ke depan tidak terdapat penambahan dan perubahan secara signifikan.

Metode mekanikal memang tergantung pada *performance* kemampuan mesin pengelola namun dari segi ketuntasan pengelolaan sampah masuk dapat dikelola pada hari itu juga nampaknya terbukti di lapangan tidak ditemukan sampah menumpuk sehingga memastikan keadaan lokasi pengelolaan bersih untuk menghindari timbulnya bau dan lalat. Hal ini dengan metode ini sampah masuk dapat dikontrol sesuai kapasitas mesin pengelola. Selain itu pengelolaan metode ini membuat area pengelolaan bersih juga didukung

disediakan alat pengangkutan sampah ke TPA dengan rutin dan pembakaran sampah melalui mesin *incinerator*.

Fakta juga dengan mesin pemilahan dapat membuat fasilitas menjadi bersih dan memerlukan luas lahan yang cukup sempit, namun kapasitas tidak dapat mengakomodir dari jumlah besar. Untuk dapat meningkatkan secara progresif maka memerlukan peningkatan kapasitas mesin pemilahan sehingga naik menjadi progresif atau dilakukan kombinasi seperti penggabungan metode mekanikal dan biologis.

Permasalahan pada metode ini juga pada pilahan mesin gibrig yang menghasilkan bubur organik. Bubur ini sulit dikelola karena tercampur dengan serpihan-serpihan plastik, sehingga harus ada inovasi untuk mengelola atau memanfaatkan bubur organik sehingga meminimalisasi residu yang terbentuk.

Terkait kualitas RDF produk RDF metode mekanikal tidak dapat dimanfaatkan langsung oleh pengguna industri di Kabupaten Bandung yang rata-rata sebagai bahan substitusi batu bara. Penggunaan produk ini memerlukan perlakuan dengan mencampur bahan organik keras untuk menaikkan nilai kalor pada produk.

Metode biologis dengan mengeringkan sampah mengandalkan mikroorganisme. Teknik pengeringan sampah ini bergantung pada aktivitas biologi dari mikroorganisme (bakteri dan fungi) untuk mengurangi kadar air dengan meningkatkan nilai kalor (meningkat berkisar 30-40%) sampah dengan kadar air yang tinggi dapat ditransformasikan menjadi bahan bakar padat yang dapat digunakan di masa yang akan datang. *Biodrying* biasanya dilakukan dengan proses aerob. Prinsip dari proses ini

yaitu mendorong terjadinya evaporasi dengan memanfaatkan panas yang dihasilkan dari proses degradasi zat organik. Keuntungan dari proses *biodrying* adalah mengurangi massa sampah dan emisi CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, serta emisi debu dari landfill sampah ke atmosfer. Teknik ini akan optimal memerlukan waktu detensi 7 -15 hari (Chaerul & Wardhani, 2020).

Metode ini memerlukan waktu detensi sehingga kekurangan metode ini harus memiliki area yang luas untuk mengatur waktu detensi penumpukan sampah proses *biodrying*. Namun di sisi lain proses ini tidak perlu memakan energi listrik dari operasionalnya. Biaya ini dapat diahlikan terhadap biaya operasional bahan mikroorganisme untuk membantu mempercepat proses pematangan *biodrying*. Metode ini memiliki keunggulan dapat memaksimalkan kapasitas TPST karena terdapat lahan yang luas dan waktu yang lama, sehingga input menjadi lebih besar. Gambar 9 sistem model dinamis *biodrying* menunjukkan mesin pencacah merupakan faktor penentu kapasitas menghasilkan RDF sehingga efektif menekan residu yang dihasilkan. Mesin pencacah menjadi fokus keberhasilan metode ini dalam menentukan volume RDF yang dihasilkan selain dari pembiayaan yang mempengaruhi jumlah SDM yang dapat memilah sampah.

Dari nilai kalor produk RDF metode ini terlihat lebih baik *performance* nya dibanding metode mekanikal. Nilai kalor berada angka 4.000 cal/gram, walaupun jika mengacu pada peraturan yang ada nilai kalor masih dibawah nilai kalor dengan batubara dengan grade rendah. Perbandingan nilai kalor ini jika dibandingkan dengan negara lain dapat dilihat pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Perbandingan Kualitas RDF ditinjau dari Beberapa Negara (Chaerul dkk, 2020)

Parameter	Satuan	Basis	Puspa	Cicukang	Indonesia	Finlandia	Thailand
			Jelekong	Oxbow			
			Nilai	Nilai	Nilai	Nilai	Nilai
Kadar Air	%	adb	5.56	8.13	<20	25-35	<30
Kadar Abu	%	adb	58.51	12.4	N/A	20	N/A
Nilai Kalor	cal/gr	adb	2243.25	4009.64	2987.6	3100-3824	N/A



Tabel 6 menunjukkan metode *biodrying* lah yang mendekati kualitas dengan beberapa negara sekitar dari segi nilai kalor, kadar air dan kadar debu.

Pemodelan dinamis menunjukkan pengelolaan sampah secara umum mengurangi sampah masuk ke dalam pemrosesan akhir (TPA) (Rafew & Rafizul, 2021). Pengelolaan sampah khususnya fasilitas pengelolaan baik itu juga *incinerator* dapat menambahkan umur TPA serta menurunkan rumah gas kaca (Lu *et al.*, 2021). Sistem dinamis pada pengelolaan sampah di Kabupaten Bandung dengan TPST RDF menunjukkan peningkatan sampah yang terkelola serta meminimalisasi residual yang terbentuk. Gambar 12 menunjukkan bagaimana sampah tidak terkelola dari tahun-tahun terus mengalami peningkatan walaupun sudah ada TPST. Keadaan ini terjadi karena kapasitas yang stagnan tidak mengalami kenaikan kinerja sedangkan timbulan sampah terus naik mengikuti kenaikan jumlah penduduk tiap tahun. Intervensi kebijakan perlu dilakukan untuk meningkatkan kapasitas TPST serta menurunkan residu dibuang ke TPA. Penurunan residu ini akan berdampak lingkungan seperti penurunan produksi gas rumah kaca (GRK) dan ketersediaan umur TPA semakin panjang (Lu *et al.*, 2021).

Pemodelan ini juga dilakukan oleh Surjandari *et al.*, 2009 yang melakukan pemodelan untuk melihat arah kebijakan yang tepat dalam rangka menurunkan residual dibuang ke TPA. Pemodelan tersebut menunjukkan perlu dilakukan pengelolaan sampah secara bertahap dengan proses kompos dan insinerasi untuk mengurangi dampak lingkungan yaitu tingginya sampah masuk ke TPA (Surjandari *et al.*, 2009). Sejalan juga dengan Artika dan Chaerul tahun 2020 proses pengurangan dan

kombinasi pengelolaan sampah lainnya seperti insinerasi perlu dilakukan untuk mengurangi beban TPPAS Nambo. Dalam sistem dinamikanya membahas bagaimana pengurangan gas emisi kaca jika lahan urug sampah berkurang (Artika & Chaerul, 2020).

Mengabaikan polemik dampak pembakaran sampah pemanfaatan RDF dengan sistem pembakaran dapat menurunkan gas GRK lebih baik daripada proses penimbunan atau *open dumping* di TPA. Proses pembakaran menghasilkan pengurangan gas emisi hingga 90% dibandingkan dengan lahan urug (Lu *et al.*, 2021). Hal ini sebanding dengan penelitian yang dilakukan YPBB, 2023 menerangkan pengelolaan sampah dengan pembakaran menghasilkan gas rumah kaca sebesar 312.493 Ton CO<sub>2</sub> eq/year lebih baik daripada proses praktik penimbunan di TPA yang menghasilkan 733.197 Ton CO<sub>2</sub> eq/year. Namun praktik paling optimal menurunkan gas rumah kaca adalah praktik *Zero Waste* yang hanya menghasilkan 76.062 Ton CO<sub>2</sub> eq/year (Emergency & Change, 2023). Pengelolaan RDF pada model dinamis ini menunjukkan pengurangan residu yang dibuang ke TPA sehingga akan mempersempit kebutuhan lahan akan pembangunan atau perluasan TPA. Berkurangnya akan luas kebutuhan TPA akan berdampak pada berkurangnya penggunaan lahan atau *deforestasi* lahan hutan yang ada.

## KESIMPULAN

Pengelolaan sampah menjadi RDF (*Refuse-Derived Fuel*) dengan metode *biodrying* tidak memerlukan konsumsi listrik sehingga menekan biaya operasional listrik, mudah diaplikasikan serta nilai kalor yang dihasilkan >4.000 cal/gram sedangkan *one day one process* operasional tergantung tenaga listrik serta nilai kalor <3.000 cal/gram. Model dinamis pada pengelolaan sampah melalui RDF agar berkelanjutan perlu adanya skenario intervensi kebijakan. Intervensi ini diharapkan dapat meningkatkan kapasitas pengelolaan sehingga mengurangi residu dibuang ke TPA.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih sebanyak-banyaknya kepada pengelola TPST yang berada pada naungan Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bandung atas kerjasamanya

dalam proses penelitian serta penyediaan data untuk menunjang penelitian

## DAFTAR PUSTAKA

- Aminudin, M., Mahbubi, A., Puspita Sari, R. A. (2014). Simulasi Model Sistem Dinamis Rantai Pasok Kentang Dalam Upaya Ketahanan Pangan Nasional. *Agribusiness Journal*. 8(1): 1–14. <https://doi.org/10.15408/aj.v8i1.5125>
- Artika, I., Chaerul, M. (2020). Model Sistem Dinamik untuk Evaluasi Skenario Pengelolaan Sampah di Kota Depok. *Jurnal Wilayah Dan Lingkungan*. 8(3): 261–279. <https://doi.org/10.14710/jwl.8.3.261-279>
- Chaerul, M., Wardhani, A. K. (2020). Refuse Derived Fuel (RDF) from Urban Waste using *Biodrying* Process: Review. *Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi Dan Pengembangan Teknik Lingkungan*. 17(1): 62–74. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v17i1.62-74>
- Dinas Lingkungan Hidup Kab. Bandung. (2021). *Laporan Due Diligence Kajian Sosial*. <https://iswmp.id/report>
- Emergency, W., Change, C. (2023). Banning Organic Waste As A Solution To The Regional Waste Management Crisis And Climate Change. *YPBB*. 1(1).
- Hendra, Y. (2016). Perbandingan Sistem Pengelolaan Sampah di Indonesia dan Korea Selatan: Kajian 5 Aspek Pengelolaan Sampah. *Aspirasi: Jurnal Masalah-Masalah Sosial*. 7(1): 77–91. <https://doi.org/10.46807/aspresiasi.v7i1.1281>
- Hutabarat, I. N., Priyambada, I. B., Samudro, G., Lokahita, B., Syafrudin, S., Wardhana, I. W., Hadiwidodo, M. (2018). Potensi Material Sampah Combustible pada Zona Pasif TPA Jatibarang Semarang sebagai Bahan Baku RDF (Refuse Derived Fuel). *Jurnal Teknik Mesin*. 7(1): 24. <https://doi.org/10.22441/jtm.v7i1.2241>
- Kusmayadi, A. (2024). Pasca Lebaran TPA Sarimukti Terima 46 Ribu Ton Sampah Bandung Raya. In *metrojabar.pikiran-rakyat.com*.
- Lu, D., Iqbal, A., Zan, F., Liu, X. (2021). *Life-Cycle-Based Greenhouse Gas, Energy, and Economic Analysis of Municipal Solid Waste Management Using System Dynamics Model*.
- Rafew, S. M., Rafizul, I. M. (2021). Application of system dynamics model for municipal solid waste management in Khulna city of Bangladesh. *Waste Management*. 129: 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.059>
- Rohman, K. N., F. (2021). The Design of Washer and Dryer Machine for Chopped Plastic Bottle. *Procedia of Engineering and Life Science*. 1(1). <https://doi.org/10.21070/pels.v1i1.956>
- Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional. (2023). *Capaian Kinerja Pengelolaan Sampah Diunduh 2 Juli 2024. dari situs World Wide Web. KLHK*. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>
- Sucipto. (2020). *Ringkasan eksekutif*. <https://doi.org/10.1787/a26f6edb-id>
- Surjandari, I., Hidayatno, A., Supriatna, A. (2009). Model Dinamis Pengelolaan Sampah Untuk Mengurangi Beban Penumpukan. *Jurnal Teknik Industri*. 11(2): 134–147. <https://doi.org/10.9744/jti.11.2.134-147>
- Xiao, S., Dong, H., Geng, Y., Tian, X., Liu, C., Li, H. (2020). Policy impacts on Municipal Solid Waste management in Shanghai: A system dynamics model analysis. *Journal of Cleaner Production*. 262: 121366. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121366>
- Zulfikar, T. E., Supriyadi, S., Rosihin, R., Nalhadi, A. (2023). Pemodelan Sistem Persediaan Menggunakan Pendekatan Sistem Dinamik. *JITEKH*. 11(2): 62–69. <https://www.jurnal.harapan.ac.id/index.php/Jitekh/article/view/783%0Ahttps://www.jurnal.harapan.ac.id/index.php/Jitekh/article/download/783/564>