



## Evaluasi Produksi *Refuse-Derived Fuel* (RDF) dari Sampah Perkotaan (Studi Kasus: RDF Plant di Kabupaten Cilacap)

### Evaluating Refuse-Derived Fuel (RDF) Production from Municipal Solid Waste (Case Study: Cilacap Regency RDF Plant)

ESTI MEGA MAULIDAYANTI<sup>1,2\*</sup>, MANIS YULIANI<sup>3</sup>, MUHAMMAD HAQQIYUDDIN ROBBANI<sup>3</sup>, WIHARJA<sup>3</sup>, ERLIZA HAMBALI<sup>1</sup>, DWI SETYANINGSIH<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor, 16680, Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Tangerang Selatan, 15314, Indonesia

<sup>3</sup>Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Tangerang Selatan, 15314, Indonesia

\*estimega@apps.ipb.ac.id

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 1 August 2023

Accepted 25 July 2024

Published 31 July 2024

##### Keywords:

Refuse-Derived Fuel

Municipal Solid Waste

Mechanical-Biological Treatment

Co-processing

Cement Industry

#### ABSTRACT

Indonesia's prevailing waste management paradigm, which still employs a collect-transport-dispose system, results in waste accumulation and adverse effects on health and the environment. In contrast, the cement sector's necessity for renewable and environmentally benign energy is increasing. Refused-derived fuel (RDF) technology is one of the potential ways to solve both concerns. This study aimed to assess the viability of RDF manufacturing processes and products for the cement industry and to offer recommendations for a national standard. This research procedure included identifying waste composition and characteristics, observing RDF production, and evaluating RDF product quality, such as testing water content, ash content, and heating value. The results demonstrated that the Cilacap RDF Plant successfully produced RDF from municipal solid waste using the mechanical-biological treatment (MBT) method. The biodrying process could reduce waste's moisture content from 55.44% to 23.63% and increase the heating value to approximately 15 MJ/kg. Nevertheless, the quality of RDF products must be enhanced to align with the biomass standards for the industry (SNI 8675: 2018). The Cilacap Plant RDF products were feasible for application in the cement industry, with further product quality improvement and production process optimization. The findings could be a reference for developing national standards in manufacturing RDF as an alternative fuel in the cement industry.

#### INFORMASI ARTIKEL

##### Histori artikel:

Diterima 1 Agustus 2023

Disetujui 25 Juli 2024

Diterbitkan 31 Juli 2024

##### Kata kunci:

Bahan Bakar Jumputan Padat

Sampah Perkotaan

Mechanical-Biological Treatment

Co-processing

Industri Semen

#### ABSTRAK

Pengelolaan sampah di Indonesia masih menggunakan sistem kumpul-angkut-buang, menyebabkan penumpukan sampah dan dampak negatif terhadap kesehatan dan lingkungan. Di sisi lain, kebutuhan energi terbarukan dan ramah lingkungan di sektor industri semen terus meningkat. Teknologi bahan bakar jumputan padat atau *refuse-derived fuel* (RDF) dianggap mampu menyelesaikan kedua permasalahan tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan proses pembuatan dan produk RDF untuk industri semen serta memberikan rekomendasi untuk pembuatan standar nasional. Prosedur penelitian ini mencakup identifikasi komposisi dan karakteristik sampah, observasi tahapan proses produksi RDF, dan evaluasi kualitas produk RDF seperti kadar air, kadar abu, dan nilai kalor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa RDF Plant Cilacap berhasil memproduksi RDF dari sampah kota menggunakan metode *mechanical-biological treatment* (MBT). Proses *biodrying* mampu menurunkan kadar air sampah dari 55,44% menjadi 23,63% dan meningkatkan nilai kalor menjadi sekitar 15 MJ/kg. Namun, kualitas produk RDF masih perlu ditingkatkan untuk memenuhi standar biomassa untuk industri (SNI 8675:2018). Produk RDF Plant Cilacap dinilai cukup layak untuk industri semen, dengan beberapa rekomendasi untuk peningkatan kualitas produk dan optimalisasi proses produksi. Temuan ini diharapkan dapat menjadi rujukan dalam pembuatan standar nasional dalam produksi RDF sebagai bahan bakar alternatif di industri semen.

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Saat ini permasalahan sampah menjadi isu penting yang dihadapi oleh berbagai kota di Indonesia. Paradigma pengelolaan sampah kumpul-angkut-buang masih merupakan sistem pengelolaan sampah yang paling banyak digunakan. Berkaitan dengan permasalahan tersebut, telah ada Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional (Jaktranas) Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga. Di dalam kebijakan tersebut terdapat target pengelolaan sampah untuk tahun 2025, yaitu 30% untuk pengurangan sampah dan 70% untuk penanganan sampah. Berdasarkan Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN), pada tahun 2023, Indonesia telah mampu mengurangi sampahnya sebesar 16,06% dan melakukan penanganan sampah sebesar 50,22% dari total sampah 24.477.789,08 ton/tahun (KLHK, 2024). Pencapaian tersebut menggambarkan bahwa target Jaktranas belum tercapai yang artinya bahwa kegiatan pengelolaan sampah belum dapat mengimbangi besarnya timbunan sampah. Akibatnya adalah TPA menjadi *overload* dan akhirnya menimbulkan penumpukan sampah di berbagai tempat.

Penumpukan-penumpukan sampah tersebut berdampak pada kesehatan manusia dan lingkungan. Dampak terhadap kesehatan manusia dapat dikategorikan menjadi 4 kelompok yaitu: penularan infeksi yang dapat diakibatkan oleh bakteri, virus, dan organisme penyebab penyakit lainnya; cedera fisik yang meliputi luka, tenggelam, trauma benda tumpul, cedera bahan kimia atau cedera akibat radiasi; penyakit tidak menular seperti kerusakan sel dan perkembangan kanker akibat paparan jangka panjang; efek emosional/psikologis seperti bau menyengat dan sampah yang tidak enak dipandang mata (Ziraba *et al.*, 2016). Dampak sampah terhadap lingkungan meliputi: kontaminasi sampah laut; kontaminasi udara, tanah, dan air; interaksi langsung antara pemulung dengan limbah berbahaya (Ferronato & Torretta, 2019). Dampak yang lain adalah terjadinya pemanasan global akibat emisi gas rumah kaca (GRK) yang berpotensi dihasilkan oleh pembakaran ataupun degradasi sampah (Eneh & Oluigbo, 2012).

Lee *et al.*, (2016), melaporkan bahwa kegiatan pengelolaan sampah harus ditingkatkan untuk meminimalkan dampak yang timbul dari permasalahan sampah. Tidak hanya pada perbaikan sistem penanganan sampah tetapi juga diperlukan teknologi yang ramah lingkungan untuk pengolahan sampah. Hal ini sesuai dengan Undang-Undang Republik Indonesia No. 16 Tahun 2016 yang menargetkan Indonesia untuk menurunkan emisi GRK sebesar 29% dengan usaha sendiri dan 41% dengan kerjasama internasional pada tahun 2030. Di dalam undang-undang tersebut dijelaskan bahwa peningkatan energi terbarukan dapat menurunkan emisi GRK. Salah satu teknologi yang saat ini sedang dikembangkan untuk peningkatan energi terbarukan adalah teknologi *refuse-derived fuel* (RDF) atau bahan bakar jumputan padat.

Teknologi RDF adalah teknologi yang mengolah sampah menjadi bahan bakar alternatif melalui proses penghancuran dan pengeringan (Shapouri & Moghimi, 2018). Adapun sampah yang masuk untuk proses pembuatan RDF adalah sampah yang telah dipisahkan dari sampah yang dapat didaur ulang (seperti logam), sampah *inert* (seperti kaca), dan sampah basah yang dapat membusuk yang memiliki kadar air dan abu tinggi sebelum dihaluskan seperti sampah makanan (European Commission, 2003). Teknologi RDF mampu mengubah sampah menjadi bahan bakar sekunder dalam industri semen dengan meningkatkan nilai kalornya (Kara, 2012). Hemidat *et al.*, (2019) menjelaskan bahwa dengan proses *biodrying*, nilai kadar air sampah berkurang sehingga terjadi peningkatan nilai kalor sampah sebesar 58%. Penambahan 15% RDF sebagai bahan bakar sekunder yang digunakan dalam tanur semen dapat menghemat biaya *petcoke* dan dapat menurunkan kadar emisi CO<sub>2</sub> yang dilepaskan. Selain itu, dengan adanya sampah yang diolah menjadi RDF, jumlah sampah yang masuk ke TPA menjadi berkurang sehingga dapat memperpanjang umur TPA.

Berkaitan dengan pengolahan sampah menjadi RDF untuk industri semen di Indonesia, beberapa penelitian telah dilakukan. Di antaranya adalah rancang bangun *solar dryer* untuk meningkatkan kualitas RDF (Arifianti *et al.*, 2018), analisis kualitas produk RDF sebagai bahan bakar alternatif industri semen dan evaluasi pada produksinya (Ummatin *et al.*, 2019), analisis emisi penggunaan RDF sebagai bahan bakar semen (Prariesta *et al.*, 2023), dan penilaian ekonomi RDF sebagai bahan bakar semen (Zahir *et al.*, 2024). Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, evaluasi terkait kualitas RDF untuk bahan bakar semen telah dilakukan. Namun, proses dan produk RDF yang dibahas hanya mengacu pada proses RDF secara umum dan data-data yang digunakan merupakan data yang diambil dari *focus group discussion* sehingga belum menggambarkan proses RDF secara detail di lapangan. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan evaluasi kelayakan proses pembuatan dan produk RDF untuk *co-processing* industri semen berdasarkan proses yang ada di lapangan dengan studi kasus RDF *Plant* Kabupaten Cilacap.

### 1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kelayakan teknis proses produksi RDF yang dihasilkan untuk aplikasi di industri semen, serta memberikan rekomendasi sebagai masukan dalam pembuatan standar nasional.

## 2. METODE

### 2.1 Metode Evaluasi

Penelitian diawali dengan identifikasi komposisi dan karakteristik sampah yang diproses pada RDF *Plant* Cilacap. Penelitian dilanjutkan dengan observasi langsung dan dokumentasi tahapan proses produksi RDF yang dilakukan di RDF *Plant* Cilacap. Evaluasi kualitas produk RDF dilakukan dengan menguji kadar air, kadar abu, dan nilai kalornya. Rekomendasi disusun berdasarkan hasil yang diperoleh untuk peningkatan kualitas dan efisiensi produksi. Rekomendasi diharapkan dapat menjadi rujukan

untuk pembuatan standar nasional terkait RDF sebagai bahan bakar *co-processing* di industri semen. Pada penelitian ini digunakan data primer dan data sekunder untuk mengevaluasi kelayakan proses dan produk RDF. Data primer diperoleh dari penelitian langsung di lapangan yaitu di RDF *Plant* Cilacap yang dilakukan pada bulan Juli 2022. Data-data ini meliputi data proses dan data kualitas RDF. Untuk data-data pendukung yang tidak diperoleh di lapangan, dilakukan studi literatur untuk melengkapi data-data tersebut.

### 2.2 Peta Lokasi RDF *Plant* Cilacap



Gambar 1. Peta lokasi RDF *Plant* Cilacap (koordinat: -7.64680, 109.05154)

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Evaluasi Komposisi dan Karakteristik Sampah

Komposisi dan karakteristik sampah memiliki peranan penting untuk menentukan kelayakan proses produksi RDF. Hal ini karena komposisi dan karakteristik sampah berfungsi sebagai dasar dalam perhitungan nilai kalor sampah yang akan berpengaruh terhadap teknologi yang digunakan (Untari *et al.*, 2024). Pada teknologi termal yang dibakar secara langsung, terdapat batasan nilai kalor minimal agar terjadi pembakaran sampah tanpa adanya bahan bakar tambahan yaitu sebesar 7 MJ/kg dengan minimal nilai *combustible fraction* 25%, maksimal kadar air sebesar 50%, dan maksimal kadar abu 60% (World Bank, 1999). Hal ini berarti bahwa jika nilai kalor sampah kurang dari batasan nilai kalor minimal, maka sebaiknya tidak

menggunakan pembakaran secara langsung untuk mengolah sampah. Pada penelitian ini, komposisi dan karakteristik sampah diperoleh dari literatur-literatur yang terkait. Berikut ini komposisi dan karakteristik sampah di Kabupaten Cilacap pada tahun 2022.

Tabel 1 menunjukkan bahwa komposisi sampah didominasi oleh sampah sisa makanan sebesar 58% kemudian diikuti oleh sampah plastik (16,4%), sampah lainnya (10,7%), sampah kertas/karton (9,7%), kayu/ranting (1,7%), logam (1,3%), kain (1,3%), dan sampah kaca (1,2%). Nilai kalor yang dihasilkan pada komposisi sampah tersebut adalah sebesar 5.617 kJ/kg dengan *combustible fraction* sebesar 31,13%, kadar air sebesar 51,95%, dan kadar abu sebesar 16,92%. Jika dibandingkan dengan batasan minimal nilai kalor untuk pembakaran tanpa bantuan bahan bakar tambahan, nilai kalor sampah belum memenuhi. Nilai kadar air juga telah melebihi batas maksimal (50%). Hal ini karena sampah didominasi oleh sampah sisa makanan yang notabene memiliki nilai kalor rendah dan kadar air tinggi. Berdasarkan hal ini, maka pembakaran secara langsung kurang tepat karena akan membutuhkan energi tambahan yang cukup besar agar terjadi pembakaran. Pengolahan sampah menjadi RDF untuk bahan bakar alternatif pada pabrik semen dapat menjadi salah satu pilihan agar sampah dapat diminimalkan.

Saat ini belum ada kriteria nilai kalor yang pasti untuk bahan bakar alternatif pada industri semen (Rahman *et al.*, 2015). Dari beberapa literatur yang diperoleh, nilai kalor untuk RDF berkisar antara 2.500–3.582,69 kcal/kg (10,47–15 MJ/kg) (Setiaji *et al.*, 2023; Karwat *et al.*, 2014; Rahman *et al.*, 2015). Jika dibandingkan dengan nilai kalor sampah di Kabupaten Cilacap, nilai tersebut masih belum dapat dicapai. Apalagi jika nilai kalor sampah di Kabupaten Cilacap dibandingkan dengan nilai kalor batu bara sebesar 31.475 kJ/kg (Rahman *et al.*, 2015), perbedaan nilai kalornya akan semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa sampah tidak dapat secara langsung dijadikan sebagai bahan bakar untuk industri semen. Pengolahan sampah menjadi RDF diperlukan agar nilai kalor sampah dapat meningkat dan dapat mengimbangi nilai kalor batu bara sehingga dapat dijadikan sebagai bahan bakar alternatif pada industri semen.

Tabel 1. Komposisi dan karakteristik sampah di Kabupaten Cilacap tahun 2022

Komponen	Komposisi sampah (%)	Nilai kalor (kJ/kg)	Kadar air (%)	Combustibel fraction (%)	Kadar abu (%)
Sisa makanan	57,7	1.103	38,06	11,94	7,67
kayu/ranting	1,7	159	0,60	1,02	0,09
kertas/karton	9,7	625	4,56	4,60	0,54
plastik	16,4	3.308	4,76	10,38	1,28
logam	1,3	-2	0,08	0,00	1,25
kain	1,3	147	0,41	0,79	0,05
kaca	1,2	-1	0,04	0,00	1,13
lainnya	10,7	278	3,44	2,41	4,90
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>5.617</b>	<b>51,95</b>	<b>31,13</b>	<b>16,92</b>

Sumber: (KLHK, 2024; World Bank, 1999)

Tabel 2. Komposisi dan karakteristik sampah di RDF Plant Cilacap setelah pemilahan

Komponen	Komposisi (%)	Nilai kalor spesifik (kJ/kg)	Nilai kalor (kJ/kg)	Kadar air (%)	Combustible fraction (%)	Kadar abu (%)
Sisa makanan	64,46	1.912	1.233	42,54	13,34	8,57
kayu/ranting	1,90	9.310	177	0,66	1,14	0,10
kertas/karton	8,13	6.440	523	3,82	3,85	0,46
plastik	13,56	20.144	2.731	3,93	8,57	1,06
lainnya	11,95	2.584	309	3,83	2,68	5,45
<b>Total</b>	<b>100</b>		<b>4.973</b>	<b>54,79</b>	<b>29,58</b>	<b>15,64</b>

Sumber: (KLHK, 2024; World Bank, 1999)

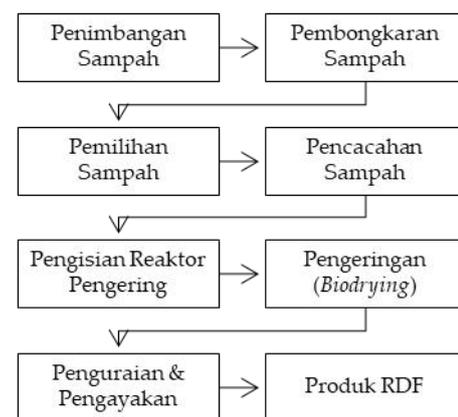
Pada pengolahan sampah menjadi RDF, tidak semua jenis sampah masuk ke proses pengolahan. Di RDF Plant Cilacap, sampah yang dipilah adalah sampah kertas, sampah plastik, logam, kaca, dan kain. European Commission (2003), Gunadi et al., (2023), dan Krüger et al., (2014) menjelaskan bahwa sampah yang dipisahkan adalah sampah yang masih dapat didaur ulang, sampah inert, sampah yang dapat menyebabkan kontaminasi pada produk, dan sampah yang dapat merusak sistem peralatan. Namun, terdapat perbedaan terkait dengan pemilahan sampah sisa makanan. Pada penelitian ini, sampah sisa makanan tidak dipisahkan. Hal ini karena sampah sisa makanan menyediakan nutrisi untuk mikroorganisme pada proses *biodrying* pengolahan sampah menjadi RDF (Ma et al., 2021). Tabel 2 menunjukkan perhitungan komposisi dan karakteristik sampah setelah dilakukan pemilahan yang mengacu pada asumsi: a) sampah plastik yang didaur ulang berupa PP dan PET dengan persentase sebesar 26% dari sampah plastik total (Hidayat et al., 2019); b) sampah kertas dan karton yang dipilah sebesar 25% (Azmiyati et al., 2022).

Dari data Tabel 2 diperoleh bahwa nilai kalor sampah setelah pemilahan adalah 4.973 kJ/kg dengan kadar air sebesar 54,79%, *combustible fraction* sebesar 29,58%, dan kadar abu sebesar 15,64%. Jika dibandingkan dengan kondisi sebelum pemilahan, nilai kalor sampah mengalami penurunan. Walaupun nilai kadar abu menurun, tetapi nilai kadar air meningkat dan nilai *combustible fraction* menurun. Hal ini terjadi karena sampah sisa makanan yang memiliki komposisi paling tinggi dan nilai kalor spesifik paling rendah tidak dipilah. Kondisi tersebut akan berubah setelah melalui proses *biodrying*. Nilai kalor sampah sisa makanan yang awalnya rendah, setelah melalui proses *biodrying*, nilai kalornya akan meningkat (Suryawan et al., 2022). Besarnya peningkatan nilai kalor akan bergantung pada kondisi prosesnya.

### 3.2 Evaluasi Tahapan Proses Produksi RDF

Tingginya permintaan semen di Indonesia dan makin minimnya bahan bakar yang digunakan dalam proses produksi semen, mendorong industri mencari sumber energi baru dan terbarukan sebagai bahan bakar alternatif (Agustina & Sutamiharja, 2015). RDF Plant Cilacap terletak di Kecamatan Jeruklegi, Kabupaten Cilacap, Jawa Tengah, mengolah sampah menjadi bahan bakar alternatif dengan kapasitas 150 ton per hari (tpd) menghasilkan 60 ton RDF yang dimanfaatkan sebagai substitusi batu bara oleh

industri semen. Fasilitas RDF Plant Cilacap dibangun di atas tanah seluas 1 hektar atas inisiasi anak usaha Semen Indonesia Group (SIG), PT SBI, yang dilaksanakan melalui kolaborasi dengan Pemerintah Kabupaten Cilacap, Pemerintah Provinsi Jawa Tengah, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, serta Pemerintah Kerajaan Denmark. Tujuan utama *plant* RDF adalah untuk mengurangi kandungan air sampah hingga mencapai sekitar 20% (berat kering) dengan ukuran material sampah yang relatif seragam yakni ≤5 mm. Secara umum diagram alir produksi RDF diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan proses produksi RDF di RDF Plant Cilacap

RDF Plant Cilacap menggunakan metode *mechanical-biological treatment* (MBT) dalam proses pengolahannya. Dalam berbagai studi tentang pengolahan sampah menjadi RDF di dunia, MBT sering digunakan sebagai teknologi utama. MBT menggabungkan pemisahan mekanis dan pengolahan biologis untuk memproduksi RDF dengan kualitas yang lebih baik. Velis et al. (2009) mengatakan bahwa umumnya proses MBT melibatkan pemisahan awal sampah, penguraian bahan organik melalui *biodrying*, dan pemrosesan mekanis lanjutan seperti pengayakan untuk menghasilkan RDF. Metode ini dianggap lebih efisien dalam mengurangi volume sampah dan meningkatkan nilai kalor RDF dibandingkan dengan metode konvensional. RDF Plant Cilacap memiliki perbedaan dengan yang dilakukan oleh Brunner et al. (2021), di mana terdapat proses peletisasi dalam proses produksinya. Hal ini disebabkan oleh perbedaan persyaratan produk yang diinginkan oleh *offtaker*. PT SBI sebagai salah satu industri semen mensyaratkan produk dalam bentuk yang mudah

terurai (*fluffy*) untuk memudahkan proses pengumpanan (*feeding*). Sedangkan bentuk pelet umumnya disyaratkan oleh pembangkit listrik yang menggunakan teknologi stoker sebagai metode pengumpanannya. Pemilihan metode MBT yang melibatkan proses *biodrying* di RDF Plant Cilacap dirasa cukup tepat dan layak dengan kondisi komposisi dan karakteristik sampah yang ada di Kabupaten Cilacap.

### 3.2.1 Evaluasi Proses Pemilahan Sampah

Proses produksi RDF diawali dengan proses pemilahan bahan baku yakni sampah yang didatangkan dari wilayah Kabupaten Cilacap dan sekitarnya. Selain alasan teknis, pemilahan sampah juga dilakukan guna mendukung program pemerintah dalam melaksanakan *reduce, reuse, dan recycle* (3R) dan *circular economy*. Barang-barang yang masih mempunyai nilai ekonomi (layak jual) diambil oleh sektor informal yang ada di sekitar area pemilahan. Pada fasilitas pemilahan di RDF Plant Cilacap sudah disediakan sebuah "hanggar" yang dilengkapi dengan atap, akan tetapi fasilitas peralatan pendukung pemilahannya belum diadakan secara optimal. Fasilitas pemilahan sampah di RDF Plant Cilacap dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Fasilitas pemilahan sampah di RDF Plant Cilacap

Berdasarkan hasil observasi di lapangan, pemilahan sampah yang dilakukan di RDF Plant Cilacap menggunakan konsep 3R dan *circular economy* yaitu mengambil sampah yang masih bernilai jual ekonomi, bahan berbahaya dan beracun (B3), dan tidak memiliki daya bakar di antaranya kardus, karton, plastik, kaca, logam. Sedangkan sampah organik seperti sisa makanan, kertas, dan kantong kresek tidak dipilah dan menjadi bahan utama yang digunakan dalam pengolahan sampah menjadi RDF. Sejalan dengan penelitian dari Srisaeng et al. (2017), yang dilakukan di daerah Lampang, Thailand, pemilahan dilakukan dengan menghilangkan bahan-bahan yang dapat didaur ulang atau berbahaya. Hal serupa dilaporkan oleh Pieper et al. (2020), pemilahan sampah pada pengolahan biomassa menjadi RDF ini juga dilakukan di berbagai negara seperti 43% di Eropa, 15% di Amerika Utara, 8% di Tiongkok, Korea Selatan, dan Jepang, serta sekitar 3% di India. Hal ini mendorong proses pemilahan sampah di lapangan oleh sektor informal menjadi lebih cepat.

Berdasarkan kondisi di lapangan, area pemilahan sampah (*picking bay area*) masih tergolong kecil untuk ukuran kapasitas pengolahan sampah 150 ton per hari (tpd). Area tersebut juga masih dikatakan tidak *safety*, di mana

sektor informal dan *loader* berada di lokasi yang sama tanpa sekat dan area khusus. Agar dapat beroperasi secara maksimal dan aman, perlu penambahan *conveyor* dan ditambah fasilitas *bag breaker* untuk mengoyak sampah yang terdapat di dalam kantong sebelum sampah dimasukkan ke dalam *shredder*. Jenis *conveyor* yang perlu ditambahkan dilengkapi dengan *magnetic separator* untuk memisahkan besi dan logam-logam lain dengan basis *ferrous*, serta *ballistic separator* sebagai komponen pemisah antara logam dan sampah biasa. Proses pemilahan sampah di RDF Plant Cilacap menjadi salah satu sektor yang perlu ditingkatkan kelayakannya. Mengingat proses ini juga sangat mempengaruhi efektifitas dan efisiensi proses selanjutnya.

### 3.2.2 Evaluasi Proses Pencacahan (*Shredding*) Sampah

Setelah terbebas dari material yang tidak dapat terbakar, B3, dan sampah yang masih layak jual, kemudian sampah dimasukkan ke dalam *shredder* untuk dicacah. Tujuan dari proses *shredding* adalah memperkecil ukuran sampah yang akan diproses secara *biodrying*. *Shredder* yang digunakan di RDF Plant Cilacap berjenis *dual-shaft*, bekerja menggunakan tenaga hidrolik. *Shredder* mempunyai 2 rangkaian "pisau" yang berputar berlawanan arah. Penggunaan *shredder* selain untuk menyeragamkan ukuran sampah sebelum dilakukan pengeringan, juga sebagai pencacah produk RDF yang memiliki ukuran besar (*oversize*). Mesin ini mempunyai kecepatan putaran yang rendah, tetapi memiliki tenaga yang besar. Penggunaan sistem hidrolik ini akan mempermudah pengoperasian alat, karena dengan komposisi sampah yang beraneka ragam, sangat memungkinkan terjadinya *clogging*. Mesin ini dilengkapi dengan pengaman *clogging* dengan cara membalikkan arah putaran pisau sehingga sampah diharapkan dapat terurai dan motor penggerak tetap aman serta terhindar dari panas yang diakibatkan oleh beban yang berlebihan. Area *shredding* di RDF Plant Cilacap dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Area *shredding* di RDF Plant Cilacap

Kondisi di lapangan menunjukkan bahwa mesin *shredder* mengalami beberapa kali kemacetan saat digunakan. Salah satu alasan terjadinya kemacetan adalah terdapatnya sampah yang basah. Hal serupa juga dilaporkan oleh Widikda et al. (2022) yang menjelaskan bahwa kendala pada proses operasional mesin pencacah kerap terjadi akibat adanya sumbatan oleh sampah basah. Oleh karena itu, diperlukan perhatian khusus dan perawatan (*maintenance*) yang baik pada proses *shredding* untuk menjaga kinerja mesin optimal dan akurat. Adapun

*maintenance* yang dapat dilakukan adalah dengan pemeriksaan getaran, suara, dan kelurusan (*alignment*) komponen yang memerlukan peralatan ukur yang akurat. Selain itu, perlu dilakukan penerapan menggunakan metode *six sigma define, measure, analyze, improve, dan control* (DMAIC) pada komponen mesin produksi RDF. Pemilihan jenis *dual-shaft shredder* di RDF Plant Cilacap dianggap cukup layak dan sesuai, baik dengan kondisi sampah yang masuk maupun dengan target ukuran hasil cacahan yang diinginkan oleh *offtaker* industri semen. Di mana *dual-shaft shredder* umumnya menghasilkan cacahan dengan ukuran yang relatif lebih besar (*coarse*) ketimbang jenis *single-shaft shredder* yang cenderung menghasilkan cacahan dengan ukuran yang lebih halus (*finer*) (Luo et al., 2013; Vatskicheva & Grigorova, 2017).

### 3.2.3 Evaluasi Proses Pengeringan (*Biodrying*) Sampah

Proses produksi RDF di RDF Plant Cilacap memiliki tujuan utama yakni menurunkan kadar air yang ada di dalam sampah. *Biodrying* dipilih sebagai unit proses yang digunakan dalam rangka mencapai tujuan tersebut. Proses *biodrying* di RDF Plant Cilacap membutuhkan waktu sekitar 21 hari untuk menurunkan kadar air sampah dan mengubahnya menjadi RDF. *Biodrying* termasuk teknologi pengeringan sampah yang sudah cukup umum digunakan di banyak negara maju (Rada et al., 2006).

Cacahan sampah yang telah melewati tahap *shredding* dibawa menggunakan *loader* ke dalam reaktor pengeringan (*bay*). RDF Plant Cilacap mempunyai 9 buah *bay* yang masing-masing berukuran panjang 30 m, lebar 10 m, dan tinggi 1,60 m, serta dilengkapi dengan penutup semipermeabel (*semipermeable membrane cover*), seperti yang tertera pada Gambar 5. Masing-masing *bay* dilengkapi dengan unit aerasi mengingat bahwa proses yang diterapkan pada *biodrying* adalah proses aerobik. Setiap unit *bay* mampu menampung sebanyak 120–150 ton sampah segar untuk dikeringkan. Untuk memenuhi sebuah *bay*, dibutuhkan waktu sekitar 3 hari menggunakan *loader*, mengingat timbulan sampah di wilayah Kabupaten Cilacap dan sekitarnya baru mencapai 35–40 ton per hari saja. Gambar 6 menunjukkan area *biodrying* di RDF Plant Cilacap.



Gambar 5. Penutup semipermeabel reaktor pengeringan (*bay*) di RDF Plant Cilacap

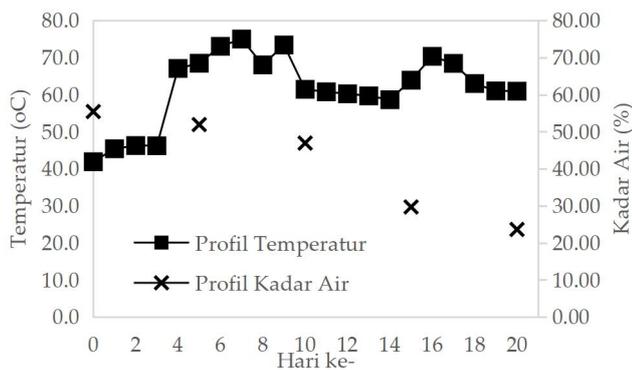


Gambar 6. Area *biodrying* di RDF Plant Cilacap

Selama proses *biodrying* berlangsung, satu-satunya kondisi operasi yang diatur adalah durasi aerasi. Aerasi yang dilakukan di RDF Plant Cilacap menggunakan sistem hidup-mati (*on-off*) dengan siklus waktu (menit) 9:3, 10:2, dan 11:1 yang disesuaikan dengan kondisi lapangan. Prinsip proses *biodrying* adalah memanfaatkan panas yang dihasilkan dari aktivitas degradasi zat organik yang dilakukan oleh mikroorganisme yang ada di dalam sampah untuk menguapkan air (Chaerul & Wardhani, 2020). Oleh karena itu, aerasi diperlukan untuk menyuplai oksigen kepada mikroorganisme guna mendukung kondisi pertumbuhannya dan membawa uap air yang ter evaporasi keluar dari reaktor (Purwono et al. 2016). Pola aerasi yang digunakan di RDF Plant Cilacap sejalan dengan hasil yang dilaporkan oleh Yuan et al. (2018) dan Sen & Annachhatre (2015), di mana faktor kunci yang mempengaruhi proses *biodrying* adalah waktu aerasi bukan laju aerasi ketika total volume aerasi yang sama digunakan.

Menurut hasil observasi lapangan, penutup semipermeabel memiliki peran yang sangat penting dalam proses *biodrying* di RDF Plant Cilacap. Penutup semipermeabel memungkinkan uap air yang dihasilkan dari proses *biodrying* bisa meninggalkan reaktor, tetapi air yang berada di luar reaktor tidak dapat masuk ke dalam reaktor. Hal ini sesuai dengan yang dilaporkan oleh Ma et al. (2018) bahwa penutup semipermeabel memiliki karakteristik pemisahan yang sangat selektif untuk uap air. Hasil observasi lapangan juga menemukan bahwa laju alir aerasi harus dapat membuat penutup semipermeabel mengembang, dengan demikian diharapkan terjadi aliran satu arah (*one through*) sehingga uap air yang ada di luar reaktor tidak dapat masuk kembali ke dalam reaktor. Fenomena ini serupa dengan yang dilakukan oleh Robledo-Mahón et al. (2018) bahwa penggunaan kombinasi antara penutup semipermeabel dengan aerasi yang tepat dapat mengurangi durasi proses pengeringan secara signifikan.

Gambar 7 menunjukkan profil kondisi operasi yang dipantau selama proses *biodrying* berlangsung. Temperatur yang disajikan merupakan rata-rata dari tiga titik pemantauan yang diposisikan pada bagian dasar, tengah, dan atas sampah yang ada di dalam *bay*. Data temperatur ini merupakan rata-rata harian yang dihitung dari data pemantauan setiap jam. Selain itu, data kadar air juga diperoleh dari hasil *sampling* di bagian depan, tengah, dan belakang *bay*, serta disajikan sebagai rata-rata dari hasil pengukuran tersebut. Kadar air diukur menggunakan metode gravimetri dengan mengikuti standar ASTM D2216-80.



Gambar 7. Profil temperatur dan kadar air sampah di RDF Plant Cilacap

Temperatur pada proses *biodrying* mula-mula berada di sekitar 40°C dan meningkat hingga mencapai puncak sekitar 70°C pada hari ke-6 hingga ke-9, sebelum stabil di kisaran 60°C hingga akhir periode pemantauan. Peningkatan temperatur ini mencerminkan aktivitas mikroorganisme yang tinggi, di mana dekomposisi bahan organik menghasilkan panas yang membantu proses pengeringan sampah (Velis et al., 2009). Profil temperatur ini sejalan dengan yang dilaporkan oleh Adani et al. (2002) dan Chaerul & Wardhani (2020), bahwa proses *biodrying* berjalan dalam kondisi terbaik untuk menunjang aktifitas mikroba pada suhu mesofilik atau termofilik, proses akan berjalan lambat di awal, panas yang ada digunakan untuk menaikkan suhu menjadi termofilik sebelum populasi jamur dan *actinomycetes* berkembang. Setelah organisme mesofilik hilang, dekomposisi sampah dilakukan oleh bakteri termofilik. Temperatur akan naik sampai 70°C setelah hari ke-2 sampai ke-6. Setelah itu, temperatur akan turun perlahan yang menunjukkan bahwa proses telah stabil. Terjadinya penurunan temperatur di hari ke-7 dan ke-14 disebabkan oleh proses pembalikan atau *turning* yang dilakukan untuk memastikan proses penurunan kadar air sampah merata di seluruh bagian.

Kadar air sampah pada proses *biodrying* menunjukkan tren penurunan yang cukup linear. Kadar air yang diukur di awal proses sebesar 55,44% menunjukkan perbedaan yang sangat kecil dengan hasil perhitungan teoritis yang dilakukan di penelitian ini (54,79%). Kadar air kemudian terus menurun seiring waktu selama proses *biodrying*. Di akhir proses *biodrying*, kadar air sampah terukur mencapai 23,63%. Hal ini menunjukkan bahwa proses *biodrying* dapat menurunkan kadar air secara efektif sebanyak 31,81%. Jumlah kadar air yang diturunkan ini lebih rendah dari hasil yang dilaporkan oleh Wolny-Kołodka et al. (2021) sebanyak 41%, tetapi lebih baik bila dibandingkan dengan hasil yang didapatkan oleh beberapa eksperimen yang dilakukan oleh Zaman et al. (2021) sebanyak 29,86%, Elnaas et al. (2015) sebanyak 26%, dan Shao et al. (2010) sebanyak 24,7%.

Proses *biodrying* di RDF Plant Cilacap dapat ditingkatkan lagi efektifitas dan efisiensinya dengan melakukan penambahan parameter kondisi operasi yang dipantau seperti kadar oksigen, kualitas, dan temperatur udara ambien untuk mengoptimalkan laju udara yang disuplai ke dalam reaktor. Optimalisasi proses *biodrying* juga dapat dilakukan dengan memantau parameter *volatile*

*solid* agar dapat ditentukan titik optimal di mana kadar air sudah cukup rendah dan *volatile solid* tidak terlalu banyak yang terdegradasi sehingga nilai kalor yang dihasilkan dapat lebih tinggi. Proses pembalikan juga dapat dilakukan lebih efektif dengan menggunakan *turning machine* (*turning single bay*). Penggunaan *turning machine* dapat menghemat area, penggunaan bahan bakar, juga waktu proses pembalikan.

### 3.2.4 Evaluasi Proses Penguraian (*Decompacting*) dan Pengayakan (*Screening*) Sampah

Setelah proses pengeringan, sampah yang ada di *bay* masih dalam keadaan menggumpal. Oleh karena itu, gumpalan sampah kemudian diurai menggunakan alat *decompact*. Sampah yang telah terurai kemudian diayak menggunakan alat *screener* bertipe *disc screen* untuk memisahkan antara produk RDF, *inert*, dan *reject* (*oversized product*). Kedua alat ini diletakkan berdekatan di RDF Plant Cilacap, sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 8. Material *reject* yang tertahan di alat *screener* kemudian disesuaikan lagi ukurannya menggunakan alat *shredder* yang sama dengan yang digunakan untuk mencacah sampah segar.



Gambar 8. Area *decompacting* dan *screening* di RDF Plant Cilacap

Penggunaan alat *decompact* di RDF Plant Cilacap ini selaras dengan yang dilaporkan oleh Gallardo et al. (2014) dan Santos et al. (2023) bahwa penggunaan *decompact* dalam proses pengolahan RDF membantu dalam mengurangi ukuran partikel dan meningkatkan homogenitas material. Hal ini secara signifikan meningkatkan efisiensi proses berikutnya seperti *shredding* dan *screening*. Lebih lanjut Gallardo et al. (2014) dan Santos et al. (2023) juga menuturkan bahwa pemilihan *disc screen* dalam produksi RDF menawarkan berbagai keunggulan yang menjadikannya pilihan yang lebih efisien dan andal dibandingkan dengan *trommel* ataupun *vibrating screen*. Efisiensi pemisahan, kapasitas tinggi, pemeliharaan rendah, dan fleksibilitas adalah beberapa faktor utama yang mendukung penggunaan *disc screen*. Proses *decompacting* dan *screening* pada proses produksi di RDF Plant Cilacap dirasa sudah cukup baik dalam hal performa. Namun demikian, kendala non-teknis yang kerap dialami di lapangan adalah kesulitan dalam mencari *spare-part disc* yang masih bergantung pada produk impor yang cenderung lama proses pengirimannya. Oleh karenanya, perlu dipertimbangkan pula sisi non-teknis dalam proses pemilihan peralatan ke depannya.

Tabel 3. Karakteristik bahan baku dan produk di RDF *Plant* Cilacap

Parameter	Satuan	Bahan Baku	Produk RDF	Standar Biomassa untuk Industri*	Standar Bahan Bakar Jumputan Padat**		
					Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3
Kadar Air	%	54,79	23,63	maks. 12	<15	<20	<25
Kadar Abu	%	15,64	20,95	maks. 5	<15	<20	<25
Nilai Kalor	kJ/kg	4.973	12.515	min. 16.500	≥19.999	≥14.999	≥12.259

\*SNI 8675:2018

\*\*SNI 8966:2021

### 3.3 Evaluasi Produk RDF

Kelayakan produk RDF untuk *co-processing* industri semen dapat dilihat dari karakteristiknya. Pada penelitian ini, produk RDF dari *Plant* Cilacap diuji kadar air, kadar abu, dan nilai kalornya untuk kemudian dibandingkan dengan bahan baku dan bahan bakar alternatif yang lazim digunakan oleh industri semen. Tabel 3 menunjukkan perbandingan karakteristik produk RDF *Plant* Cilacap dengan standar biomassa untuk industri dan bahan bakar jumputan padat (*solid recovery fuel/SRF*) yang digunakan oleh industri pembangkit listrik. Sampai artikel ini ditulis belum ada standar nasional yang mengatur terkait karakteristik RDF untuk industri, khususnya industri semen.

Produk RDF *Plant* Cilacap mengalami penurunan kadar air yang sangat signifikan setelah melewati proses *biodrying*. Secara teoritis, dengan kadar air di bawah 50%, RDF sudah dapat dibakar tanpa bahan bakar tambahan apapun (World Bank, 1999). Penurunan kadar air ini menunjukkan bahwa penguapan air dari sampah akibat aktivitas degradasi mikroorganisme berjalan dengan efektif. Penurunan kadar air berdampak positif pada naiknya nilai kalor hampir tiga kali lipat dari bahan baku. Nilai kalor tersebut juga sejalan dengan beberapa penelitian terdahulu yakni berkisar 2.500–3.582,69 kcal/kg (10,47–15 MJ/kg) (Setiaji et al., 2023; Karwat et al., 2014; Rahman et al., 2015). Kenaikan persentase kadar abu pada produk RDF disebabkan oleh turunnya kandungan organik yang dapat dibakar akibat degradasi yang dilakukan oleh mikroorganisme dalam proses *biodrying* (Tambone et al., 2011; Sen & Annachhatre, 2015).

Kendati menunjukkan hasil positif, karakteristik produk RDF *Plant* masih di atas nilai maksimal standar biomassa untuk industri (SNI 8675:2018) baik dari sisi kadar air, kadar abu, maupun nilai kalor. Sedangkan menurut standar bahan bakar jumputan padat (BBJP, SNI 8966:2021) produk RDF *Plant* Cilacap hanya masuk dalam kategori kelas 3. Sebagai perbandingan, RDF *plant* di India yang notabene memiliki karakteristik dan komposisi yang mirip dengan RDF *Plant* Cilacap mampu menghasilkan RDF dengan kadar air (kurang dari 10%), kadar abu (2,8%), dan nilai kalor (21.275 kJ/kg) yang dapat memenuhi kedua standar tersebut (Kimambo & Subramanian, 2014). Hal serupa juga ditunjukkan oleh RDF *plant* di negara Thailand (Itsarathorn et al., 2022) dan Brazil (Chaves et al., 2021). Negara-negara tersebut memiliki standar nasional yang mengatur karakteristik dan kualitas RDF yang akan dimanfaatkan oleh industri, khususnya industri semen (Chandrasekhar & Pandey, 2019).

Dari hasil uji karakteristik produk RDF *Plant* Cilacap, dapat dilihat bahwa kualitas RDF masih perlu ditingkatkan untuk dapat memenuhi standar biomassa untuk industri (SNI 8675:2018) meskipun telah memenuhi standar BBJP Kelas 3 (SNI 8966:2021). Sebagai catatan, karakteristik produk RDF *Plant* Cilacap ini masih dapat diterima oleh PT SBI. Hal ini dikarenakan oleh persentase substitusi RDF yang digunakan oleh PT SBI masih relatif rendah (5–6%). Dengan persentase rendah tersebut, kualitas RDF yang belum memenuhi standar memberikan dampak yang sangat minimal pada proses *co-processing*. Hal yang sama juga terjadi pada proses *co-firing* yang dilakukan oleh industri pembangkit. Persentase substitusi yang digunakan dibatasi maksimal hanya 5% untuk meminimalkan dampak yang dapat ditimbulkan. Untuk kasus industri semen, apabila kualitas bahan bakar alternatif memenuhi standar biomassa untuk industri (SNI 8675:2018), persentase substitusi dapat mencapai angka 20%. Di beberapa negara Eropa, persentase substitusi bahan bakar alternatif di industri semen bahkan dapat mencapai angka di atas 40% (Sarc et al., 2019). Hal ini sangat memungkinkan apabila kualitas produk RDF tidak menimbulkan dampak negatif terhadap proses produksi di industri semen.

Kualitas produk RDF *Plant* Cilacap dapat dijadikan rujukan sebagai standar nasional dengan beberapa catatan, antara lain: (1) dipertimbangkan persentase maksimal penggunaan substitusinya; (2) diperhitungkan proyeksi timbulan sampah yang dapat terserap; (3) perlu dilakukan uji emisi dampak dari penggunaan RDF; dan (4) perlu ditetapkan baku mutu khusus untuk industri semen yang menggunakan RDF sebagai bentuk insentif dalam hal kontribusi penanganan sampah. Bila tidak mempertimbangkan hal-hal tersebut, maka produk RDF *Plant* Cilacap perlu dievaluasi lebih lanjut terutama dampaknya terhadap proses dan emisi yang ditimbulkan untuk dapat dijadikan rujukan standar nasional.

## 4. KESIMPULAN

Evaluasi kelayakan teknis proses pembuatan dan kualitas produk RDF di RDF *Plant* Cilacap untuk industri semen telah berhasil dilakukan. Berdasarkan hasil penelitian, sampah di Kabupaten Cilacap didominasi oleh sisa makanan yang memiliki kadar air tinggi dan nilai kalor rendah. Melalui proses *biodrying*, nilai kalor sampah meningkat secara signifikan, meskipun belum mencapai tingkat yang setara dengan batu bara. Proses produksi RDF di RDF *Plant* Cilacap menggunakan metode *mechanical-biological treatment* (MBT) yang efektif dalam mengurangi kadar air sampah melalui proses *biodrying*, menurunkan

kadar air dari 55,44% menjadi 23,63%, dan meningkatkan nilai kalor menjadi sekitar 15 MJ/kg. Pendekatan ini bisa menjadi referensi berharga bagi daerah lain di Indonesia dengan kondisi sampah yang serupa dalam menentukan metode pengolahan sampah yang efektif. Meskipun kualitas produk RDF belum sepenuhnya memenuhi standar biomassa untuk industri (SNI 8675:2018), RDF *Plant* Cilacap dapat dijadikan rujukan dalam pembuatan standar nasional terkait proses pembuatan dan produk RDF sebagai bahan bakar alternatif di industri semen dengan beberapa peningkatan seperti optimalisasi lebih lanjut pada proses *biodrying*, penambahan fasilitas pendukung seperti *conveyor* dan *magnetic separator*, serta pemantauan parameter kondisi operasi yang lebih detail. Evaluasi parameter proses *biodrying* dan karakteristik produk perlu dilakukan terutama yang mempengaruhi emisi yang ditimbulkan dari substitusi bahan bakar dengan RDF di industri semen. Standar nasional dapat menjadi rujukan baik bagi produsen maupun *offtaker* dalam menentukan negosiasi harga secara adil dan objektif. Standar nasional juga diperlukan untuk memastikan RDF yang digunakan oleh industri semen tidak menghasilkan emisi yang tidak melebihi baku mutu yang telah ditetapkan.

#### PERSANTUNAN

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Pemerintah Kabupaten Cilacap dan pengelola RDF *Plant* Cilacap atas dukungan data dan informasi yang telah diberikan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Adani F, Baido D, Calcaterra E, & Genevini P. (2002). The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste. *Bioresour Technol.* 83(3):173–179. doi:10.1016/S0960-8524(01)00231-0.
- Agustina, H., Kusnoputranto, H., & Sutamiharja, R. T. M. (2015). Emission estimation model of dioxin/furan releases from cement industry used wastes in co-processing. *Research Journal of Science and IT Management*, 4(04), 56-67.
- Arifianti, Q. A. M. O., Abidin, M. R., Nugrahani, E. F., & Ummatin, K. K. (2018). Rancang bangun solar dryer untuk meningkatkan kualitas refuse derived fuels (RDF) sebagai bahan bakar alternatif di kiln burner industri semen. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 9(3), 211-220.
- Azmiyati, U., Rancak, G. T., & Jannah, W. (2022). Upaya Pengelolaan Sampah Berdasarkan Komposisi Sampah Di Kota Mataram. *LAMBDA: Jurnal Ilmiah Pendidikan MIPA dan Aplikasinya*, 2(2), 36-42.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2018). SNI 8675:2018 Pelet Biomassa untuk energi. Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2021). SNI 8966:2021 Bahan bakar jumputan padat untuk pembangkit listrik. Indonesia.
- Brunner, I.M.I.M., Norhidayat, A., & Brunner, S.M. (2021). Pengolahan Sampah Organik dan Limbah Biomassa dengan Teknologi Olah Sampah di Sumbernya. *J Serambi Eng.* 6(3), 2085–2095. doi:10.32672/jse.v6i3.3120.
- Chaerul, M., & Wardhani, A. K. (2020). Refuse Derived Fuel (RDF) dari Sampah Perkotaan dengan Proses Biodrying. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 17(1), 62-74.
- Chandrasekhar, K., & Pandey, S. (2019). Co-processing of RDF in Cement Plants. *Energy Recovery Processes from Wastes*.
- Chaves, G., Siman, R., Ribeiro, G., & Chang, N. (2021). Synergizing environmental, social, and economic sustainability factors for refuse derived fuel use in cement industry: A case study in Espirito Santo, Brazil. *Journal of environmental management*, 288, 112401.
- Elnaas, A., Belherazem, A., Müller, W., Nassour, A., & Nelles, M. (2015). Biodrying for mechanical biological treatment of mixed municipal solid waste and potential for RDF production. In *3RD International Conference on Sustainable Solid Waste Management*, Tinos, Greece.
- Eneh, A. E., & Oluigbo, S. N. (2012). Mitigating the impact of climate change through waste recycling. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 4(8), 776-781.
- European Commission – Directorate General. (2003). *Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives*, Final Report.
- Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. *International journal of environmental research and public health*, 16(6), 1060.
- Gallardo, A., Carlos, M., Bovea, M.D., Colomer, F.J., & Albarrán, F. (2014). Analysis of refuse-derived fuel from the municipal solid waste reject fraction and its compliance with quality standards. *Journal of Cleaner Production*, 83, 118-125.
- Gunadi, G. I., Isman, T. N., Alawi, R., Tambunan, A. H., & Maulana, E. (2023). Study of the Potential of Refuse Derived Fuel (RDF) at the Cipayung Final Disposal Site (TPA) to Meet Industrial Quality Standards and Environmentally Friendly. *Jurnal Inotera*, 8(1), 73-81.
- Hemidat, S., Saidan, M., Al-Zu'bi, S., Irshidat, M., Nassour, A., & Nelles, M. (2019). Potential utilization of RDF as an alternative fuel to be used in cement industry in Jordan. *Sustainability*, 11(20), 5819.
- Hidayat, Y. A., Kiranamahsa, S., & Zamal, M. A. (2019). A study of plastic waste management effectiveness in Indonesia industries. *Aims Energy*, 7(3).
- Itsarathorn, T., Towprayoon, S., Chiemchaisri, C., Patumsawad, S., Wangyao, K., & Phongphipat, A. (2022). The Situation of RDF Utilization in the Cement Industry in Thailand. *2022 International Conference and Utility Exhibition on Energy, Environment and Climate Change (ICUE)*, 1-7.
- Kara, M. (2012). Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Resources, Conservation and Recycling*, 68, 21-28.
- Karwat, B., Głowiński, D., & Stańczyk, E. (2014). Using alternative fuels in the production of cement/Wykorzystanie paliw alternatywnych przy produkcji cementu. *Environmental Protection and Natural Resources*, 25(3), 35-38.

- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). (2024). SIPSN. Retrieved from <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>. Diakses tanggal 19 Juni 2024.
- Kimambo, O., & Subramanian, P. (2014). Energy efficient refuse derived fuel (RDF) from municipal solid waste rejects: a case for Coimbatore. *International Journal of Environment*, 3, 205-215.
- Krüger, B., Mrotzek, A., & Wirtz, S. (2014). Separation of harmful impurities from refuse derived fuels (RDF) by a fluidized bed. *Waste management*, 34(2), 390-401.
- Lee, S., Kim, J., & Chong, W. K. (2016). The causes of the municipal solid waste and the greenhouse gas emissions from the waste sector in the United States. *Waste management*, 56, 593-599.
- Luo, S., Yang, X., Tao, X., Luo, Y., & Fu, J. (2013). Research on the optimization of a novel municipal solid waste shredder. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(1).
- Ma, S., Sun, X., Fang, C., He, X., Han, L., & Huang, G. (2018). Exploring the mechanisms of decreased methane during pig manure and wheat straw aerobic composting covered with a semi-permeable membrane. *Waste management*, 78, 393-400.
- Ma, J., Mu, L., Zhang, Z., Wang, Z., Kong, W., Feng, S., ... & Zhang, L. (2021). Influence of thermal assistance on the biodegradation of organics during food waste bio-drying: Microbial stimulation and energy assessment. *Chemosphere*, 272, 129875.
- Pieper, C., Wirtz, S., Schaefer, S., & Scherer, V. (2021). Numerical investigation of the impact of coating layers on RDF combustion and clinker properties in rotary cement kilns. *Fuel*, 283, 118951.
- Peraturan Presiden Republik Indonesia (Perpres). (2017). Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional (Jaktranas) Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga. Indonesia.
- Priestadi, D., Edahwati, L., & Karaman, N. (2023). Analisis Emisi dari Penggunaan Refuse Derived Fuel sebagai Bahan Bakar Alternatif di Industri Semen (Studi Kasus di PT Solusi Bangun Indonesia Cilacap). *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 15(2), 194-199.
- Purwono, P., Hadiwidodo, M., & Rezagama, A. (2016). Penerapan Teknologi Biodrying dalam Pengolahan Sampah High Water Content Menuju Zero Leachate. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 13(2), 75-80.
- Rada, E. C., Ragazzi, M., Panaitescu, V., & Apostol, T. (2006). Experimental characterization of municipal solid waste bio-drying. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 92.
- Rahman, A., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., & Sharma, S. (2015). Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. *Fuel*, 145, 84-99.
- Robledo-Mahón, T., Aranda, E., Pesciaroli, C., Rodríguez-Calvo, A., Silva-Castro, G., González-López, J., & Calvo, C. (2018). Effect of semi-permeable cover system on the bacterial diversity during sewage sludge composting. *Journal of environmental management*, 215, 57-67.
- Santos, S. M., Nobre, C., Brito, P., & Gonçalves, M. (2023). Brief Overview of Refuse-Derived Fuel Production and Energetic Valorization: Applied Technology and Main Challenges. *Sustainability*, 15(13), 10342.
- Sarc, R., Seidler, I., Kandlbauer, L., Lorber, K., & Pomberger, R. (2019). Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry – Update 2019. *Waste Management & Research*, 37, 885 - 897.
- Sen, R., & Annachhatre, A. P. (2015). Effect of air flow rate and residence time on biodrying of cassava peel waste. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 18(1), 9-29. doi:10.1504/IJETM.2015.068414.
- Setiaji, N. F., Sarwono, A., & Suryawan, I. W. K. (2023). Differences in the Quality of Bottom Ash and Fly Ash for the Cement Industry as an Alternative Fuel (AF). *Journal of Earth and Marine Technology (JEMT)*, 3(2), 41-47.
- Shao, L. M., Ma, Z. H., Zhang, H., Zhang, D. Q., & He, P. J. (2010). Bio-drying and size sorting of municipal solid waste with high water content for improving energy recovery. *Waste Management*, 30(7), 1165-1170.
- Shapouri, M., & Hassanzadeh Moghimi, O. (2018). RDF Production from Municipal Wastes (Case Study: Babol City). *Environmental Energy and Economic Research*, 2(2), 137-144.
- Srisaeng, N., Tippayawong, N., & Tippayawong, K. Y. (2017). Energetic and economic feasibility of RDF to energy plant for a local Thai municipality. *Energy Procedia*, 110, 115-120. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.115.
- Suryawan, I., Fauziah, E. N., Septiariva, I. Y., Ramadan, B. S., Sari, M. M., Ummatin, K. K., & Lim, J. W. (2022). Pelletizing of various municipal solid waste: Effect of hardness and density into caloric value. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23.
- Tambone, F., Scaglia, B., Scotti, S., & Adani, F. (2011). Effects of biodrying process on municipal solid waste properties. *Bioresource technology*, 102(16), 7443-7450.
- Ummatin, K. K., Arifianti, Q. A., Hani, A., & Annisa, Y. (2019). Quality Analysis of Refused-Derived Fuel as Alternative Fuels in the Cement Industry and Its Evaluation on Production. In 2019 International Conference on Engineering, Science, and Industrial Applications (ICESI) (pp. 1-6). IEEE.
- Undang-Undang Republik Indonesia. (2016). Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 16 Tahun 2016 tentang Pengesahan Paris Agreement to The United Nations Framework Convention on Climate Change (Persetujuan Paris atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa Mengenai Perubahan Iklim). Indonesia.
- Untari, A. A. M., Wijaya, I. M. W., Partama, I. G. Y., & Ahire, K. D. (2024). Municipal Waste Characterization and Reduction Potential in Singaraja City. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(3), 756-765.
- Velis, C. A., Longhurst, P. J., Drew, G. H., Smith, R., & Pollard, S. J. (2009). Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process

- science and engineering. *Bioresource technology*, 100(11), 2747-2761.
- Vatskicheva, M., & Grigorova, I.D. (2017). Study of Two-Shaft Shredder for Crushing of Concrete, Rubber, Plastic and Wood. *Materials, methods & technologies*, 11, 238-253.
- Widikda, A. P., Mujayyin, F., & Nugrahadi, D. M. (2022). The Key Performance Indikator Kinerja Teknologi Pengolahan Sampah TPA Menjadi Bahan Bakar Alternatif Rdf (Refuse Derrived Fuels): Key Performance Indikator Kinerja Teknologi Pengolahan Sampah Tpa Menjadi Bahan Bakar Alternatif Rdf (Refuse Derrived Fuels). *Jurnal Teknologi dan Terapan Bisnis*, 5(2), 27-34.
- World Bank. (1999). *Municipal Solid Waste Incineration*. Washington, D.C.: The International Bank for Reconstruction and Development/ The World Bank.
- Wolny-Koładka, K., Malinowski, M., & Zdaniewicz, M. (2021). Energy-related and microbiological evaluation of the effects of bulking agents on the brewery hot trub biodrying. *Food and Bioproducts Processing*, 127, 398-407. doi:10.1016/j.fbp.2021.04.001.
- Yuan J, Zhang D, Li Y, Li J, Luo W, Zhang H, Wang G, & Li G. (2018). Effects of the aeration pattern, aeration rate, and turning frequency on municipal solid waste biodrying performance. *Journal of environmental management*, 218, 416-424. doi:10.1016/j.jenvman.2018.04.089.
- Zahir, B. H. M., Nurcahyo, R., & Wibowo, A. D. (2024). Economic Assessment of Refuse-Derived Fuel (RDF) Production As Waste Management Strategy and Alternative Fuel In Cement Kilns. *Journal of Law and Sustainable Development*, 12(2), e3220-e3220.
- Zaman, B., Hardyanti, N., Samadikun, B. P., Restifani, M. S., & Purwono, P. (2021). Conversion of municipal solid waste to refuse-derived fuel using biodrying. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 623, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.
- Ziraba, A. K., Haregu, T. N., & Mberu, B. (2016). A review and framework for understanding the potential impact of poor solid waste management on health in developing countries. *Archives of Public Health*, 74(1), 1-11.