

BAB 1. PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Secara ontologi, penelitian ini hendak mengkaji potensi sampah Provinsi DKI Jakarta sebagai salah satu sumber energi alternatif dalam memenuhi kebutuhan energi nasional, khususnya dalam mensubstitusi kebutuhan energi yang bersumber dari sumber daya alam tak terbarukan seperti batubara. Menurut Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM) (2021), penggunaan energi yang bersumber dari sumber daya alam tak terbarukan, terutama batu bara, diperkirakan akan habis pada tahun 2086, yang menimbulkan urgensi untuk mencari sumber energi alternatif yang berkelanjutan. Permintaan listrik diproyeksikan tumbuh sekitar 5% per tahun, Indonesia membutuhkan energi bersih EBT untuk memenuhi kebutuhan sektor industri dan komersialnya. Peningkatan energi surya, dikombinasikan dengan penyimpanan baterai untuk memaksimalkan pemanfaatannya, dapat memberikan peluang yang signifikan. Indonesia ditargetkan akan mengganti pembangkit listrik berbasis batu bara (PLTU) pada Tahun 2040 dan akan mempercepat produksi energi baru dan Terbarukan (EBT). Selain itu, target Kemitraan Transisi Energi Berkeadilan (JETP) yang tercantum dalam dokumen *Comprehensive Investment and Policy Plan* (CIPP) 2023 lebih menekankan peran EBT, dengan porsi yang lebih besar pada tenaga surya, angin, panas bumi, bioenergi, dan hidro pada tahun 2040. Target ini berarti Indonesia dapat memenuhi proyeksi kebutuhan listrik sebesar 806 TWh pada tahun 2040, dengan asumsi pangsa EBT mencapai 65%. Enhanced NDC (2022) dan Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience (LTS-LCCR) 2050 Indonesia Menargetkan net zero emissions pada 2060 atau lebih cepat dengan pengurangan dominasi PLTU batubara, mulai 2030 ke bawah. International Energy Agency (IEA) dalam skenario Net Zero Emissions 2050 (2021) menyatakan Tidak boleh ada pembangkit listrik baru berbasis batubara tanpa teknologi penangkap karbon (CCUS) yang diizinkan setelah tahun 2021, dan semua pembangkit listrik batubara tanpa CCUS harus ditutup paling lambat tahun 2040 di negara maju, dan tahun 2050 di seluruh dunia.

Disisi lain, sampah domestik di Provinsi DKI Jakarta terus bertambah dengan pesat, seiring dengan perkembangan jumlah penduduk, urbanisasi, serta peningkatan aktivitas industri dan perkantoran. Pada tahun 2022, produksi sampah Provinsi DKI Jakarta mencapai 7.543 ton per hari, dengan sampah organik menyumbang sekitar 49,87% dari total sampah yang diangkut (Badan Pusat Statistik Provinsi DKI Jakarta, 2023). Jika tidak dikelola dengan baik, akumulasi sampah ini dapat menjadi masalah lingkungan yang serius, memicu pencemaran, serta memperburuk kualitas hidup masyarakat.

Lebih jauh lagi, pemanfaatan sampah sebagai sumber energi, seperti dalam bentuk pembangkit listrik tenaga sampah (PLTSa), telah menjadi fokus di banyak negara. Menurut sebuah studi oleh Wang et al. (2023), konversi sampah organik menjadi biogas dapat mengurangi ketergantungan pada energi fosil serta mengurangi emisi gas rumah kaca. Implementasi teknologi ini di Provinsi DKI Jakarta tidak hanya dapat membantu dalam mengurangi volume sampah yang masuk ke

tempat pembuangan akhir, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap diversifikasi sumber energi nasional. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi tersebut dan merekomendasikan strategi implementasi yang efektif dalam konteks lokal, sekaligus mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan yang lebih luas.

Sampah-sampah ini didistribusikan dan dikelola berdasarkan jenisnya ke beberapa tempat pembuangan sementara sebelum akhirnya berakhir di Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Bantargebang (Gambar 1). Proses ini melibatkan pengumpulan sampah yang terorganisir pada zona-zona tertentu, di mana sampah dikategorikan berdasarkan tipe, seperti organik, anorganik, dan limbah berbahaya. Pola pembuangan sampah yang diterapkan di TPST Bantargebang ini selaras dengan penelitian Yogiesti et al. (2010), yang menyatakan bahwa pengumpulan sampah di Indonesia sering dilakukan dengan metode pengumpulan di satu titik, sehingga memudahkan pengelolaan dan pengolahan lebih lanjut.

Seiring dengan meningkatnya jumlah sampah dan kompleksitas komposisinya, ada kebutuhan mendesak untuk memperbaiki sistem pengelolaan sampah yang ada. Menurut studi terbaru oleh Nurdin et al. (2023), pengelolaan sampah yang tidak efektif dapat menyebabkan masalah lingkungan yang lebih besar, seperti pencemaran tanah dan air. Penelitian ini juga menyoroti pentingnya penerapan teknologi pemisahan dan pengolahan yang lebih modern di TPST, termasuk penggunaan teknologi ramah lingkungan yang dapat meningkatkan efisiensi pengolahan sampah dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Selanjutnya, pengembangan sistem pengelolaan yang lebih berkelanjutan, seperti pengintegrasian konsep ekonomi sirkular, dapat menjadi solusi efektif. Sebuah studi oleh Prasetyo dan Haryanto (2022) menunjukkan bahwa penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam pengelolaan sampah dapat meningkatkan tingkat daur ulang dan mengurangi ketergantungan pada tempat pembuangan akhir. Dengan demikian, pengelolaan sampah di TPST Bantargebang tidak hanya perlu mempertimbangkan aspek teknis, tetapi juga harus melibatkan pendekatan yang lebih holistik dan berkelanjutan untuk mengatasi tantangan pengelolaan sampah di Provinsi DKI Jakarta. Volume sampah harian sebesar ± 7.500 ton yang masuk ke TPST Bantargebang berdampak signifikan pada menurunnya kapasitas dan daya tampung fasilitas tersebut. Sistem pengolahan sampah yang diterapkan saat ini, yaitu controlled landfill, ternyata belum mampu meningkatkan kembali kapasitas daya tampung TPST Bantargebang secara efektif. Menurut data terbaru dari Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Provinsi DKI Jakarta (2023), jika kondisi ini terus berlanjut, TPST Bantargebang akan menghadapi risiko kelebihan muatan, yang dapat menyebabkan masalah lingkungan serius seperti pencemaran tanah dan air di sekitarnya.

Kondisi ini sangat mengkhawatirkan, karena tidak hanya akan mengganggu fungsi TPST sebagai tempat pengolahan sampah terpadu, tetapi juga dapat menyebabkan penumpukan sampah di area lain, memperburuk masalah kebersihan dan kesehatan masyarakat. Penelitian oleh Santoso et al. (2022) menunjukkan bahwa penggunaan metode pengolahan yang lebih inovatif dan berkelanjutan,

seperti teknologi *anaerobic digestion* untuk sampah organik, dapat menjadi solusi untuk mengurangi volume sampah yang harus ditampung dan meningkatkan efisiensi pengolahan.

Lebih jauh lagi, implementasi sistem pengelolaan sampah berbasis komunitas dan pemisahan sampah di sumbernya menjadi krusial dalam meringankan beban TPST Bantargebang. Sebuah studi oleh Ramadhan dan Astuti (2023) menemukan bahwa partisipasi aktif masyarakat dalam program pengelolaan sampah dapat meningkatkan tingkat daur ulang dan mengurangi volume sampah yang dibuang ke TPST. Jika langkah-langkah ini tidak diambil segera, dikhawatirkan TPST Bantargebang tidak akan dapat beroperasi lagi sebagai tempat pengolahan sampah terpadu, yang berpotensi mengancam keberlanjutan sistem pengelolaan sampah di Provinsi DKI Jakarta secara keseluruhan.

Salah satu upaya yang telah dilakukan dalam menanggulangi permasalahan ini adalah dengan dibangunnya sistem pengolahan sampah menggunakan teknologi mengolah sampah menjadi *Refuse Derived Fuel (RDF)*. sistem pengolahan *RDF* yang telah beroperasi di TPST Bantargebang mengolah 1.000 ton/hari sampah yang bersumber dari sampah lama (*landfill mining*) dan 1.000 ton/hari dari sampah baru. Nilai kalor yang dimiliki *RDF* berkisar 3.000-6.000 Kcal/Kg (Resmianty et al., 2022). Nilai kalor pada *RDF* dipengaruhi oleh komposisi sampah yang digunakan sebagai bahan baku, tingkat pengeringan, dan proses pengolahannya. *RDF* yang baik merupakan *RDF* yang mampu menghasilkan energi yang besar dengan proses yang efisien dari hasil pemrosesannya.

Upaya untuk menilai kualitas *RDF* di TPST Bantargebang adalah dengan mengukur nilai kalor *RDF* berdasarkan sumber bahan baku sampah yang diproses. Terdapat dua jenis sumber bahan baku sampah yang digunakan, yaitu sampah lama (*landfill mining*) dan sampah baru. Proses pengolahan kedua jenis sampah ini berbeda, yang memengaruhi karakteristik akhir dari *RDF* yang dihasilkan. Dari total 1.000 ton sampah yang diolah melalui *landfill mining*, jumlah residu yang dihasilkan berupa *humus soil* mencapai 41%, menunjukkan efisiensi tinggi dalam pemisahan bahan yang dapat dimanfaatkan kembali (UPT TPST Bantargebang, 2023). Sebaliknya, sampah baru hanya menghasilkan residu sebesar 4% dari total bahan baku yang digunakan, yang menandakan proses pengolahan yang lebih bersih dan terfokus pada pemanfaatan energi. Baru-baru ini, Indonesia memajukan targetnya untuk mengurangi emisi karbon dan mencapai emisi nol pada tahun 2050 (sebelumnya ditetapkan pada tahun 2060). Namun, ketergantungan historis pada tenaga fosil, serta adanya mandat harga batu bara domestik, membuat Perusahaan Listrik Negara (PLN) harus segera mencari dukungan pendanaan untuk menghentikan pembangkit listrik batu bara dan membiayai penggantinya dengan alternatif yang lebih bersih seperti energi panas bumi, air, tenaga surya, dan bioenergi.

Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian mendalam terkait nilai kalor yang dihasilkan dari produk *RDF*. Penelitian ini penting untuk mengetahui potensi energi yang terkandung dalam *RDF* dan bagaimana keduanya, baik sampah lama maupun baru, dapat berkontribusi terhadap kebutuhan energi alternatif di DKI Jakarta.

Menurut penelitian oleh Setiawan et al. (2022), nilai kalor dari RDF dapat bervariasi secara signifikan tergantung pada komposisi bahan baku, di mana sampah organik biasanya memiliki nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan dengan sampah anorganik. Dengan demikian, evaluasi nilai kalor ini tidak hanya membantu dalam menilai kualitas RDF tetapi juga dalam merancang strategi pengelolaan sampah yang lebih efisien.

Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi acuan untuk pengembangan teknologi pengolahan yang lebih baik, seperti pirolisis atau gasifikasi, yang dapat meningkatkan nilai kalor dan efisiensi konversi sampah menjadi energi. Sebuah studi oleh Hadi dan Prabowo (2023) mengemukakan bahwa teknologi-teknologi tersebut dapat mengoptimalkan pemanfaatan RDF sebagai sumber energi terbarukan, serta mengurangi dampak lingkungan dari sampah yang tidak terkelola dengan baik. Di sisi lain keberadaan sistem pengolahan *RDF* perlu diperhitungkan dan disimulasikan sejauh mana dapat mengurangi volume timbunan sampah di *landfill* yang ada dan timbunan sampah yang terus bertambah setiap harinya di TPST Bantargebang. Sistem pengolahan *RDF* dirancang sebagai salah satu upaya untuk meningkatkan kapasitas TPST Bantargebang, oleh karena itu perlu dilakukan penelitian terkait sejauh mana *RDF* mampu meningkatkan kapasitas daya tampung TPST Bantargebang berdasarkan sampah yang diolah setiap harinya. Pendekatan yang dilakukan dalam hal ini ialah menggunakan pendekatan sistem dinamik.

Rifai & Ardiatma (2022) menyatakan bahwa sampah di TPST Bantargebang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai RDF. Pemanfaatan RDF ini dapat diarahkan untuk digunakan sebagai bahan bakar dalam insinerator Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLT_{Sa}) maupun dalam industri semen, yang merupakan alternatif energi yang lebih ramah lingkungan. Dengan konversi sampah menjadi RDF, tidak hanya dapat mengurangi volume sampah yang masuk ke tempat pembuangan, tetapi juga membantu memenuhi kebutuhan energi di sektor-sektor yang berpotensi menghasilkan emisi tinggi.

RDF yang dihasilkan dari sampah ini memiliki karakteristik yang bervariasi tergantung pada komposisi sampah yang terkandung. Sebuah studi oleh Setyawan et al. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan RDF dalam proses pembakaran industri semen dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi penggunaan bahan bakar fosil, serta menurunkan emisi karbon. Selain itu, teknologi pengolahan yang tepat dapat meningkatkan kualitas RDF, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi dalam insinerator yang memerlukan spesifikasi bahan bakar tertentu.

Oleh karena itu, penting untuk mengembangkan sistem pengolahan yang efektif dan berkelanjutan di TPST Bantargebang untuk memaksimalkan potensi ini. Dengan memanfaatkan RDF dari sampah galian, DKI Jakarta tidak hanya dapat mengatasi masalah pengelolaan sampah, tetapi juga berkontribusi terhadap transisi menuju sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan.

Pada praktiknya, pemanfaatan *RDF* yang berasal dari kegiatan sampah galian ini masih memerlukan *pre-treatment* yang tepat agar dapat secara layak dimanfaatkan. Sukwika & Noviana, (2020) menambahkan bahwa kegiatan *landfill mining* berpotensi memperpanjang umur serta meningkatkan kapasitas daya

tampung TPST Bantargebang. Hal ini sesuai dengan studi yang dilakukan oleh Prihandoko, (2022) mengestimasi bahwa dengan memanfaatkan teknologi *RDF* dapat mengurangi volume sampah yang dibuang di TPA Piyungan, Yogyakarta hingga 43% tiap tahunnya. Model yang berbasis sistem dinamik dalam bidang pengelolaan sampah, telah banyak peneliti yang menggunakan antara lain untuk mencari alternatif skenario yang efektif dalam mengurangi limbah/sampah (Chaerul et al., (2020); Rahayu et al. 2013; Zulfinar dan Sembiring 2015; Al-Khatib et al. 2015; Fauzan 2017), menurunkan biaya pengelolaan sampah (Kholil 2005; Yudiyanto 2007), meningkatkan kualitas lingkungan (Bala, Arshad, dan Noh 2017), memperpanjang usia pakai lahan urug (Giannis et al. 2017; Handono 2010), meningkatkan cakupan pelayanan (Abraham 2017; Febriyanto 2016; Wildanurrisal et al. 2014), dan memperoleh operasional pengelolaan sampah yang stabil dan berkelanjutan secara ekonomi dan lingkungan (Cai dan Liu 2013). Penelitian terdahulu terkait pengolahan sampah yang telah dilakukan diantaranya:

Tabel 1 Penelitian Terdahulu

NO.	JUDUL ARTIKEL	SUMBER (NAMA JURNAL) DAN TAHUN	TUJUAN PENELITIAN	KESIMPULAN DAN HASIL PENTING
1.	Strategi Pengelolaan Sampah pada Tempat Pembuangan Akhir Bantargebang, Bekasi	Jurnal Manajemen Pembangunan Daerah. (Winahyu et al., 2013)	Tujuan umum: Merumuskan kebijakan strategi pengelolaan sampah pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bantargebang di Kabupaten Bekasi. Tujuan spesifik: 1. Mengevaluasi kinerja pengelolaan TPA Bantargebang. 2. Merumuskan strategi dan program yang dapat digunakan oleh Pemerintah Provinsi DKI Jakarta dalam pengelolaan TPA Bantargebang.	a. Optimalisasi pengelolaan TPA Bantargebang dapat dicapai melalui empat alternatif strategi, yaitu: peningkatan infrastruktur, yang melibatkan investor dalam pembangunan dan pengoperasian TPA, mempromosikan partisipasi sosial, dan meningkatkan kualitas sumberdaya manusia; b. Prioritas utama strategi yang dilakukan yaitu peningkatan anggaran dan perbaikan sistem teknologi, optimalsir ketersediaan sarana transportasi, memperlancar sarana pengangkutan sampah, optimalkan bisnis daur ulang, dan penguatan penegakan hukum terkait tata ruang kota c. Saran penelitian: Perlu dilakukannya penelitian dengan mengkaji solusi alternatif sistem pengelolaan sampah yang efektif dan berkelanjutan khususnya pengelolaan persampahan yang dapat menghasilkan sumber energi.
2.	<i>Refuse Derived Fuel from Municipal Solid Waste rejected fractions- a Case Study</i>	Energy Procedia (Bras et al., 2017)	Menentukan karakteristik hasil limbah padat buangan dari pengolahan mekanik, pengumpulan plastik dan pengolahan	a. Kandungan klorin pada RDF yang berasal dari pengolahan mekanik memiliki konsentrasi yang lebih tinggi b. Nilai pemanasan yang lebih rendah (LHV) dari RDF yang berasal dari pengumpulan selektif dan pengomposan memiliki nilai

NO.	JUDUL ARTIKEL	SUMBER (NAMA JURNAL) DAN TAHUN	TUJUAN PENELITIAN	KESIMPULAN DAN HASIL PENTING
			pengomposan dalam rangka mengevaluasi potensi valorisasi RDF	yang tidak berbeda jauh dengan batu bara namun lebih tinggi dibandingkan dengan kayu c. Karakteristik limbah padat perkotaan kompatibel dengan produksi RDF berkualitas tinggi, sehingga menjadi sumber daya penting yang secara menguntungkan yang dapat menggantikan energi primer bahan bakar fosil
3.	<i>Refuse derived fuel potential in DKI Jakarta</i>	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (H Widyatmoko, 2018)	Mengeksplorasi potensi RDF limbah padat yang berasal dari DKI Jakarta untuk menghasilkan listrik dan dapat diterima secara sosial dan politik	a. Metode ini menggunakan sampel limbah padat yang dikeringkan dan dipisahkan menjadi kertas, plastik, kaca, tetrapack, styrofoam, pampers, limbah organik, limbah makanan, kantong plastic dan tekstil. Logam dan kaca dikecualikan. Selanjutnya limbah yang telah terkarbonisasi disaring, dicampur menggunakan lem tapioka, dicetak dan dipressed menjadi briket serta dianalisa di laboratorium untuk parameter nilai kalor, kelembaban/kadar air, dan kadar abu b. Nilai kalor tertinggi yaitu berasal dari limbah karet dan taman. Plastik, fiber, kertas, karton/kardus, tekstil dan kayu dapat dimanfaatkan kembali dengan memperhatikan komponen B3 c. Saran penelitian: Penelitian lebih dalam terkait RDF dan teknisnya perlu untuk dikaji lebih lanjut.

NO.	JUDUL ARTIKEL	SUMBER (NAMA JURNAL) DAN TAHUN	TUJUAN PENELITIAN	KESIMPULAN DAN HASIL PENTING
4.	<i>Sustainability of Refuse Derived Fuel Potential from Municipal Solid Waste for Cement's Alternative Fuel in Indonesia (A Case at Jeruklegi Landfill, in Cilacap)</i>	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Paramita et al., 2018)	Menganalisa potensi RDF yang berasal dari limbah padat dari TPA Jeruklegi sebagai sumber energi industri semen	Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan keberlanjutan dari segi ekonomi, sosial, dan lingkungan. Secara finansial, RDF memiliki harga yang kompetitif dibandingkan sekam padi dan telah memenuhi persyaratan nilai kalor minimum yang dapat diterima, serta konversi limbah menjadi RDF dapat menghindari pelepasan metana. Penelitian ini belum menguji kriteria RDF secara langsung (data sekunder)
5.	Analisis Potensi Refuse Derived Fuel (Rdf) Dari Sampah Pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Di Kabupaten Tegal Sebagai Bahan Bakar Incinerator Pirolisis	Sintek: Jurnal Mesin Teknologi (Rania et al., 2019)	Mengkaji peran RDF sebagai bahan bakar insinerator pirolisis	- Potensi energi sampah 4K1P (kertas, kayu, kain, karet/kulit dan plastik) memiliki rata-rata nilai kalor sebesar 4819,220 kcal/kg. - Persentase komposisi bahan baku penyusun RDF terdiri dari 15,35% sampah kertas, 1% sampah kayu, 2% sampah kain, dan 2,35% sampah karet/kulit dengan tambahan 8% sampah plastik
6.	Status Keberlanjutan Pengelolaan Sampah Terpadu di TPST Bantargebang Bekasi: Menggunakan Rapfish dengan R Statistik	Jurnal Ilmu Lingkungan (Sukwika & Noviana, 2020)	Mengevaluasi status keberlanjutan pengelolaan sampah terpadu di TPST Bantargebang.	- Evaluasi dilakukan dengan mempertimbangkan dimensi Teknik pengolahan, ekonomi dan bisnis, kesejahteraan sosial, regulasi dan kelembagaan, manajemen lingkungan, dan produksi bersih - Hasil studi menunjukkan status keberlanjutan pengelolaan sampah terpadu di TPST-Bantargebang antar stakeholder sangat beragam dengan rata-

NO.	JUDUL ARTIKEL	SUMBER (NAMA JURNAL) DAN TAHUN	TUJUAN PENELITIAN	KESIMPULAN DAN HASIL PENTING
				rata nilai indeks multidimensional berkisar di 51,71 pada tingkat determinasi 97 persen. c. secara keseluruhan status keberlanjutan pengelolaan sampah terpadu di TPST-Bantargebang termasuk dalam kategori berkelanjutan (lulus).
7.	Aplikasi Model Sistem Dinamik Untuk Evaluasi Skenario Pengelolaan Sampah Di Wilayah Pelayanan Tempat Pengolahan Dan Pemrosesan Akhir Sampah (TPPAS) Nambo	Jurnal Permukiman (Chaerul & Artika, 2021)	Mengaplikasikan sistem dinamik dalam mengevaluasi berbagai skenario pengelolaan sampah di Kota Depok, Kota Bogor, Kota Tangerang Selatan, dan Kabupaten Bogor untuk mengantisipasi dioperasikannya TPPAS Nambo	a. Hasil simulasi keempat skenario menunjukkan bahwa karena keterbatasan kapasitas pengolahan sampah di TPPAS Nambo maka fasilitas pengelolaan sampah tetap dibutuhkan secara mandiri untuk mengelola sampah yang dihasilkan masing-masing kota/kabupaten b. Pengurangan sampah hingga 30% sesuai Jakstrada, merupakan skenario yang paling optimal bila mempertimbangkan jumlah timbulan sampah yang harus dikelola, biaya operasional, kebutuhan lahan untuk TPA dan emisi lingkungan.
8.	<i>Potential utilization of municipal solid waste in landfill mining TPST Bantargebang Bekasi to become Refuse Derived Fuel (RDF) feed stock</i>	Journal of Natural Resources and Environmental Management (Resmianty et al., 2022)	Menentukan potensi pemanfaatan limbah padat hasil <i>landfill mining</i> sebagai bahan baku RDF	a. Sebagian besar sampah yang masuk ke TPST Bantargebang ditimbun di titik pembuangan di masing-masing zona, sehingga dapat menimbulkan masalah baru yaitu terisinya seluruh zona stockpile yang ada, b. Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan zona penimbunan yang penuh adalah <i>landfill</i>

NO.	JUDUL ARTIKEL	SUMBER (NAMA JURNAL) DAN TAHUN	TUJUAN PENELITIAN	KESIMPULAN DAN HASIL PENTING
				<i>mining</i> yang dapat dimanfaatkan menjadi bahan baku RDF c. RDF yang berkualitas baik memiliki nilai kalor yang tinggi dan konsentrasi senyawa beracun yang rendah, dalam hal ini logam berat dan klorin (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2017 dalam DLH DKI Jakarta, 2019) d. Rekomendasi pengolahan: pre-treatment untuk mengurangi kadar air (pencacahan/pengeringan), penggunaan partikel sampah dengan diameter >100 mm atau pencampuran jumlah sampah untuk mencapai nilai kalor tinggi dan kadar abu rendah, serta menghilangkan kandungan B3
9.	<i>Application of Refuse-Derived Fuel (RDF) Plant in Piyungan Landfill Municipal Solid Waste Management</i>	ASEAN Journal of Chemical Engineering (Prihandoko et al., 2022)	Menganalisa potensi pemanfaatan RDF untuk mengurangi volume limbah padat di TPA Piyungan dan kelayakan ekonomi	a. TPA Piyungan merupakan TPA terbesar di Provinsi DI Yogyakarta yang masih beroperasi dalam kondisi kelebihan kapasitas, b. Metode pada penelitian ini dilakukan dengan melakukan permodelan dengan menggunakan sistem pengolahan mekanika biologi. Pengolahan secara biologis yaitu memanfaatkan metode biodrying untuk menstabilkan dan mengeringkan limbah padat melalui dekomposisi organik

NO.	JUDUL ARTIKEL	SUMBER (NAMA JURNAL) DAN TAHUN	TUJUAN PENELITIAN	KESIMPULAN DAN HASIL PENTING
10.	Potensi Sampah <i>Landfill Mining</i> Di TPST Bantargebang Sebagai Bahan Baku Alternatif Refused Derived Fuel (RDF)	Prosiding SAINTEK: Sains dan Teknologi (Rifa'i & Ardiatma, 2022)	Melakukan karakterisasi sampah yang telah lama tertimbun di TPST mulai dari analisis komposisi, analisis proksimat hingga analisis ultimat dan kemudian menganalisis potensi pemanfaatannya sebagai bahan baku daur ulang dan sumber energi.	c. Pengaplikasian RDF Plant pada TPA Piyungan berpotensi mengurangi volume sampah yang dibuang hingga dapat mencapai 43%. a. Proses penelitian diawali dengan ekskavasi material sampah hingga kedalaman 5-meter, yang dilanjutkan dengan penjemuran, penyaringan, dan pemilahan sampah b. Sampah galian TPST didominasi material kompos (31%), material plastic mudah terbakar (32%), dan nonplastik tidak mudah terbakar (26%) c. Sampah galian TPST berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi atau RDF karena didominasi oleh material sampah yang dapat dibakar (<i>combustible</i>) dan memiliki nilai kalor yang relatif tinggi (7,31MJ/kg). Perlu <i>pre-treatment</i> seperti pengeringan, pencacahan, pengayakan, dan pemilahan

Berdasarkan hasil penelitian tersebut di atas dapat disimpulkan bahwa, penelitian tentang pengolahan sampah masih terbatas pada penemuan tentang: (1) Optimalisasi pengelolaan TPA Bantargebang dapat dicapai melalui empat alternatif strategi, yaitu: peningkatan infrastruktur, yang melibatkan investor dalam pembangunan dan pengoperasian TPA, mempromosikan partisipasi sosial, dan meningkatkan kualitas sumberdaya manusia; (2) Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan zona penimbunan yang penuh adalah *landfill mining* yang dapat dimanfaatkan menjadi bahan baku RDF; (3) Sampah galian TPST berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi atau RDF karena didominasi oleh material sampah yang dapat dibakar (*combustible*) dan memiliki nilai kalor yang relatif tinggi dan (4) Karakteristik limbah padat perkotaan kompatibel dengan produksi RDF berkualitas tinggi, sehingga menjadi sumber daya penting yang secara menguntungkan dapat menggantikan energi primer bahan bakar fosil (5) Penelitian lebih dalam terkait RDF dan teknisnya perlu untuk dikaji lebih lanjut dan (6) Pengaplikasian RDF *Plant* berpotensi mengurangi volume sampah yang dibuang.

Penelitian ini akan memfokuskan perhatian pada kebaruan yang bersifat *improvement novelty*, yang merupakan pengembangan dari beberapa penelitian terdahulu. Salah satu aspek utama yang diangkat dalam penelitian ini adalah potensi RDF sebagai sumber energi terbarukan, dengan penekanan pada perbandingan kuantitas fisik dan kualitas kimiawi RDF dibandingkan dengan batubara. Kebaruan ini sangat penting, mengingat kebutuhan untuk beralih dari sumber energi fosil yang semakin menipis dan berkontribusi pada pemanasan global. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat dihasilkan data empiris yang lebih mendalam mengenai potensi energi yang terkandung dalam RDF, serta bagaimana pengolahannya dapat dioptimalkan untuk mencapai efisiensi yang lebih baik.

Selain itu, penelitian ini juga akan mengeksplorasi kemampuan sistem pengolahan RDF dalam mengurangi volume sampah di TPST Bantargebang. Dengan semakin meningkatnya jumlah sampah yang dihasilkan, sistem pengelolaan yang efektif menjadi sangat penting. Penelitian ini berupaya untuk mengevaluasi dan mengembangkan teknologi pengolahan yang dapat mengubah sampah menjadi RDF berkualitas tinggi, serta mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh penumpukan sampah. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat tercipta solusi yang tidak hanya mengurangi volume sampah, tetapi juga mengubahnya menjadi sumber energi yang bermanfaat.

Kebaruan lain yang ditawarkan oleh penelitian ini adalah prospek penggunaan RDF dalam perspektif keberlanjutan. RDF, yang merupakan produk sampingan dari proses pengolahan sampah, memiliki potensi untuk digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi bagaimana RDF dapat berkontribusi pada praktik keberlanjutan, baik dari segi pengurangan limbah maupun sebagai alternatif bahan bakar yang lebih ramah lingkungan. Dengan menyoroti aspek-aspek kebaruan ini, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi akademis, tetapi juga menawarkan solusi praktis bagi tantangan pengelolaan sampah dan keberlanjutan energi di Provinsi DKI Jakarta.

1.2. Rumusan Masalah

Dengan demikian, rumusan masalah pada penelitian ini mempertanyakan terkait:

- Bagaimana potensi RDF sebagai sumber energi terbarukan (kuantitas fisik dan kualitas kimiawi) dibandingkan dengan batubara?
- Seberapa besar kemampuan teknologi RDF dalam mengurangi volume sampah di TPST Bantargebang?
- Bagaimana prospek RDF dalam perspektif keberlanjutan?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan pertanyaan penelitian tersebut, maka dapat diformulasikan tujuan penelitian sebagai berikut:

- Menganalisis potensi RDF sebagai sumber energi terbarukan (kuantitas-fisik dan kualitas-kimiawi) dibandingkan dengan batubara.
- Menganalisis kemampuan teknologi RDF dalam mengurangi volume sampah di TPST Bantargebang.
- Menganalisis prospek RDF dalam perspektif keberlanjutan.

1.4. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi pihak-pihak sebagai berikut:

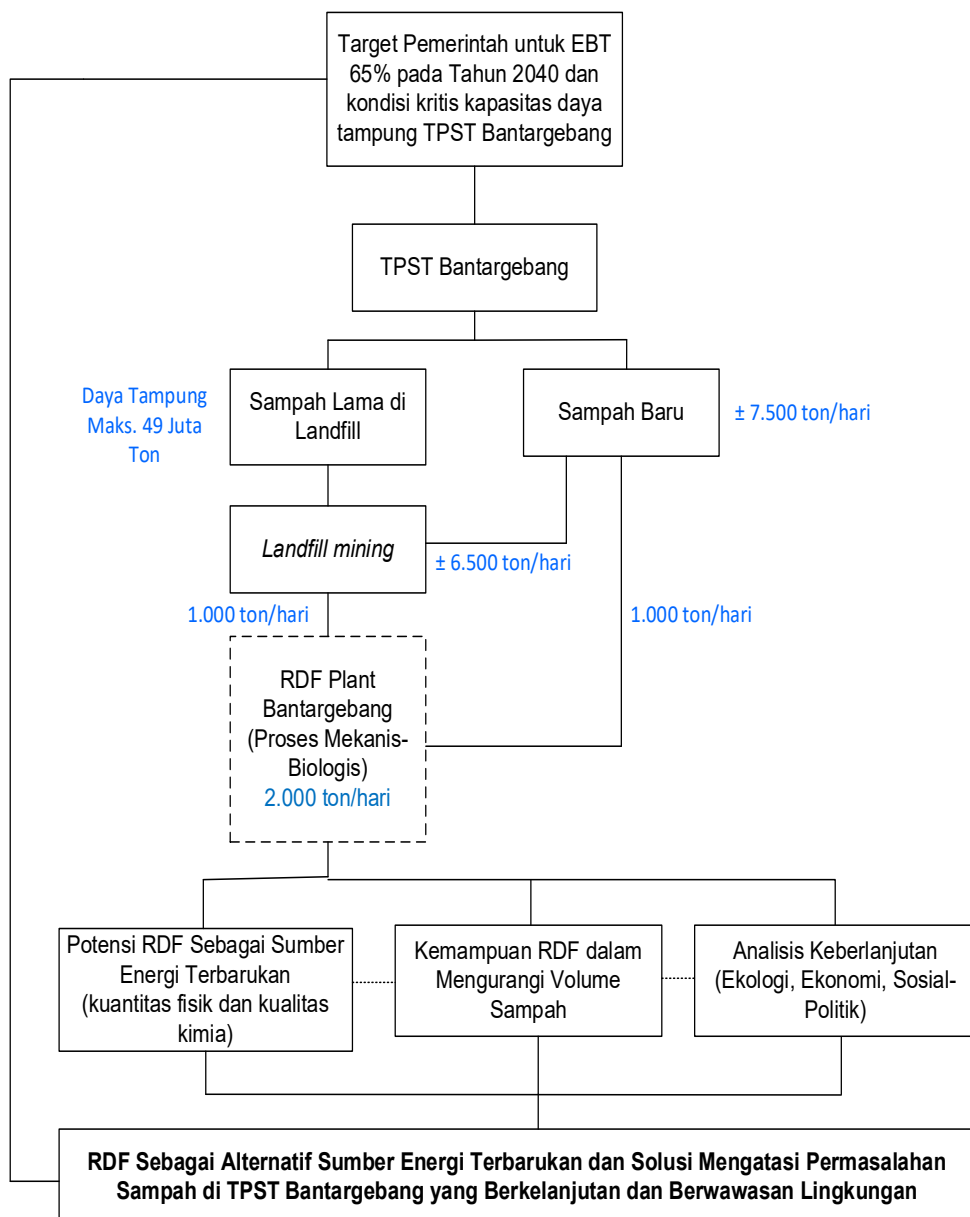
- Pemerintah Provinsi DKI Jakarta dapat memperoleh tambahan data, informasi dan rekomendasi kebijakan yang ilmiah mengenai pengelolaan sampah di TPST Bantargebang dan pengolahan sampah di DKI Jakarta.
- Akademisi dan peneliti, adanya inovasi sebagai bahan pengembangan ilmu pengetahuan lebih lanjut, khususnya dibidang pengelolaan sampah.
- Pelaku industri, mendapatkan alternatif sumber energi terbarukan yang lebih efektif dan efisien.
- Masyarakat, timbulan sampah dari permukiman masyarakat dapat dikelola dengan baik dan dampak lingkungan yang ditimbulkan dapat diminimalisasi.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

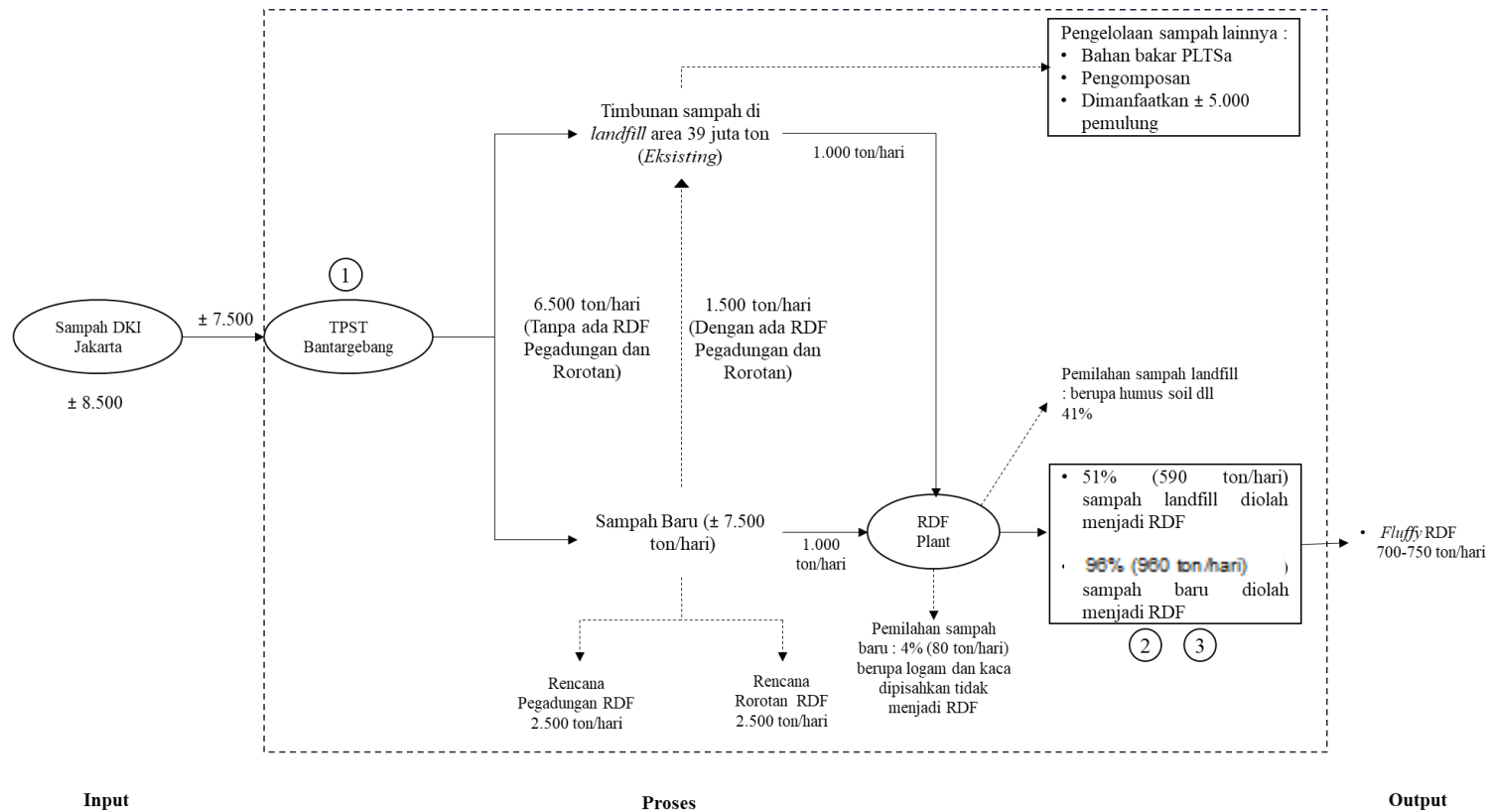
Ruang lingkup penelitian ini adalah:

- Obyek penelitian, Sampah *eksisting* pada timbunan sampah *landfill mining*, sampah baru yang diangkut dan dikelola di TPST Bantargebang dan sistem pengelolaan dengan teknologi RDF.
- Lingkup wilayah yang akan diteliti adalah wilayah TPST Bantargebang dan RDF Plant yang berada dibawah pengelolaan UPT TPST Bantargebang DLH Provinsi DKI Jakarta.
- Sumber data dan informasi dalam penelitian ini bersumber dari pihak-pihak yang memiliki kepentingan dalam pengelolaan sampah DKI Jakarta yaitu Unit Pengelola Sampah Terpadu (UPST) Bantargebang dan DLH Provinsi DKI Jakarta.

1.6. Kerangka Pikir



Gambar 1. Kerangka Pikir



Gambar 2 Alur Pengolahan Dan Pemanfaatan Sampah Di TPST Bantargebang

Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), 2023 menyatakan bahwa Provinsi DKI Jakarta menghasilkan sampah harian sebesar ± 500 ton/hari. Sampah yang dihasilkan mampu dikelola dan habis pada lapisan masyarakat sebesar ± 1.000 ton/hari, sisanya sebesar ± 7.500 ton/hari akan dikirim dan dikelola di TPST Bantargebang. Volume timbunan sampah berdasarkan data DLH Provinsi DKI Jakarta pada tahun 2022 telah mencapai 39 juta ton. Timbunan sampah *landfill* dan masukan sampah baru tiap harinya dapat dimanfaatkan sebagai salah satu sumber energi terbarukan, salah satunya adalah sistem pengolahan RDF. Gambar 1 menggambarkan sistem pengolahan RDF yang telah beroperasi di TPST Bantargebang mampu mengolah sebesar 1.000 ton/hari sampah *landfill* dan 1.000 ton/hari sampah baru, sehingga telah mengurangi sampah harian menjadi ± 6.500 ton/hari. Di sisi lain, sistem pengolahan RDF Pegadungan dan RDF Rorotan mampu mengolah sampah 5.000 ton/hari. Apabila ketiga sistem pengolahan RDF ini dioperasikan bersamaan maka dapat mengurangi timbunan ke *landfill* TPST Bantargebang menjadi ± 1.500 ton/hari. Dalam proses pemilahan sampah baru menghasilkan 4% residu berupa logam dan kaca, dimana bahan ini tidak dapat diolah menjadi RDF. Pemilahan sampah *landfill* menghasilkan residu berupa *humus soil* sebesar 41%, sehingga RDF yang dihasilkan setelah menghilangkan residu sebesar 700 -750 ton/hari dalam bentuk *fluffy*.

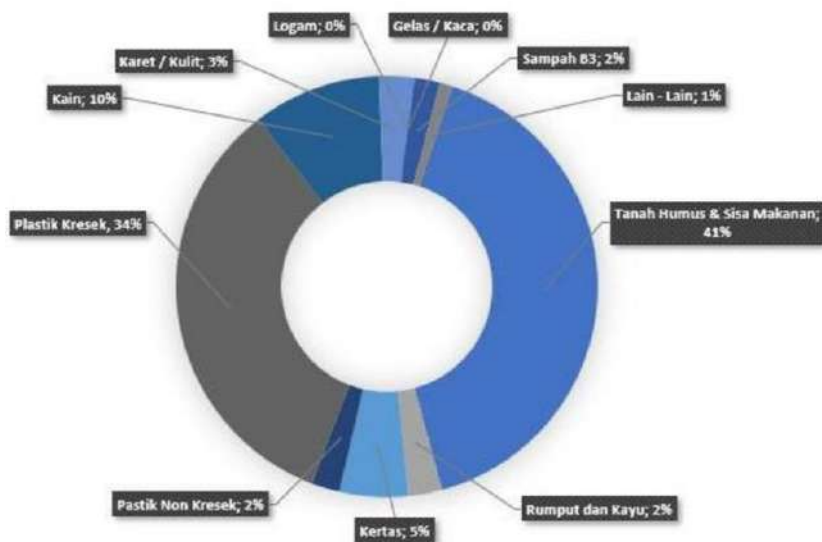
BAB II. POTENSI *REFUSE DERIVED FUEL (RDF)* SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN (KUANTITAS FISIK DAN KUALITAS KIMIA)

2.1. Latar Belakang

Suatu barang yang tidak dipergunakan atau dipakai kembali, yang telah dibuang manusia dengan kesadarannya disebut dengan sampah (Cahndra, 2006). Permasalahan sampah terus muncul seiring berjalannya waktu. Hal ini mendorong dilakukannya pengelolaan yang dilakukan untuk mengurangi volume sampah tersebut agar dapat menjaga kebersihan lingkungan, Kesehatan serta menyadarkan perilaku masyarakat tentang sampah ((KLHK), 2008). Terdapat dua jenis sampah yang dihasilkan oleh manusia, yaitu: sampah organik dan sampah anorganik. Sampah organik merupakan sampah sisa yang tidak dapat digunakan lagi atau telah membusuk dan tidak dapat dikonsumsi. Biasanya sampah ini berasal dari dapur rumah tangga seperti sisa sayur, kulit buah dan makanan yang sudah membusuk. Sampah anorganik adalah sampah sisa yang tidak membusuk, sampah kering dan tidak basah serta dapat didaur ulang kembali. Sampah ini merupakan sampah yang cukup lama terurainya. Biasanya sampah ini berasal dari plastik, kertas, kaca, logam, karet, besi, keramik dan lainnya (Gilbert et al., 1996).

Provinsi DKI Jakarta merupakan salah satu provinsi yang menghasilkan sampah terbesar di Indonesia. Dengan jumlah penduduk yang tercatat pada tahun 2023 sebanyak 10,68 juta jiwa (BPS, 2022). Sampah yang dihasilkan di Provinsi DKI Jakarta akan didistribusikan dan dikelola di TPST Bantargebang di Kota Bekasi, Jawa Barat sejak tahun 1989. TPST Bantargebang dimiliki dan dikelola Pemerintah Provinsi DKI Jakarta seluas 110 ha. TPST Bantargebang, terdiri dari enam zona pembuangan berdasarkan asal sampah dan jenis sampah dengan kapasitas daya tampung maksimum sebesar ± 49 juta ton (Sukwika & Noviana, 2020)

Volume timbunan sampah yang dihasilkan provinsi DKI Jakarta dalam sehari dapat mencapai ± 7.500 ton/hari, dimana sampah yang dihasilkan 60% didominasi sampah domestik dan sepanjang tahun tercatat 3,11 juta ton. Berdasarkan data DLH Provinsi DKI Jakarta tahun, 2022 komposisi sampah di TPST Bantargebang terdiri atas 49,87% sampah mudah terurai, 17,24% kertas, 3,18% kayu, 1,48% gelas, 1,08% logam metal, 0,90% kain, 0,78% masker, 0,70% kulit dan 0,42% B3 domestik. Sistem pengolahan sampah di TPST Bantargebang di beberapa zona telah dilakukan dengan sistem *controlled landfill* yang merupakan perbaikan dari sistem *open dumping* atau peningkatan antara sistem *open dumping* dan *sanitary landfill*.



Gambar 3. Komposisi Jenis Sampah Harian di TPST Bantargebang

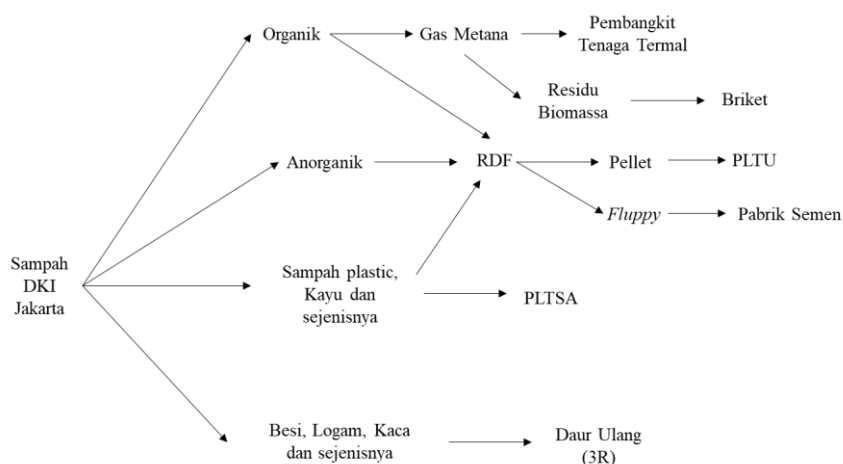
Di sisi lain sampah dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif dalam memenuhi kebutuhan energi dalam negeri khususnya dalam mensubsitusikan kebutuhan energi dari sumber daya alam tak terbarukan. Penggunaan energi yang bersumber dari sumberdaya alam tak terbarukan berupa batubara diperkirakan akan habis pada tahun 2086 (Kementerian ESDM, 2021). Berdasarkan data tersebut, cadangan batubara Indonesia diperkirakan akan habis kira-kira 83 tahun mendatang apabila tingkat produksi saat ini terus dilakukan. Sementara Indonesia sendiri memiliki sumber daya batubara sebesar 149,009 miliar ton dan cadangan terbesar 37,6014 ton (Badan Geologi, 2018). Ketergantungan penggunaan bahan bakar fosil di Indonesia harus beralih ke energi terbarukan. Kandungan energi batubara dapat bervariasi tergantung pada jenis batubara dan berbagai faktor lainnya. Ada beberapa jenis batubara utama, yaitu *lignit*, *bituminous*, dan *antrasit*, yang memiliki kandungan energi yang berbeda-beda. Berikut perkiraan kandungan energi relatif dari masing-masing jenis batubara:

- *Lignit*: jenis batubara dengan kandungan energi paling rendah, yang berkisar 25 hingga 35 MJ/Kg.
- *Bituminus*: jenis batubara yang lebih padat dan memiliki kandungan energi lebih tinggi dibandingkan *lignit* yang berkisar 30 hingga 35 MJ/Kg.
- *Antrasit*: jenis batubara dengan kandungan energi tertinggi, dapat mencapai lebih dari 35 MJ/kg. Biasanya, antrasit memiliki kandungan karbon yang sangat tinggi dan sedikit kadar air.

Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi mengamankan Kebijakan Energi Nasional (KEN) disusun berdasarkan prinsip berkeadilan, berkelanjutan, dan berwawasan lingkungan guna mendukung terciptanya

kemandirian energi dan ketahanan energi nasional. Implikasi dari kebijakan ini adalah perlunya diversifikasi energi untuk memenuhi kebutuhan energi dalam negeri, salah satunya dengan mengembangkan energi baru terbarukan (EBT) yang merupakan energi ramah lingkungan yang tidak mencemari lingkungan dan tidak memberikan kontribusi terhadap perubahan iklim dan pemanasan global. Kesenjangan yang terbentuk dari kedua kondisi tersebut menjadi dasar dilakukannya penelitian untuk mendapatkan bentuk pengelolaan yang optimal dan terbarukan. Permasalahan yang timbul dari peningkatan volume sampah TPST Bantargebang dan ancaman krisis energi di masa mendatang mendorong dilakukannya penelitian yang berpotensi memanfaatkan sampah menjadi RDF sebagai sumber energi terbarukan.

Penelitian ini akan mengkaji potensi sampah dari Provinsi DKI Jakarta sebagai salah satu sumber energi alternatif dalam memenuhi kebutuhan energi dalam negeri khususnya dalam mensubstitusi kebutuhan energi yang bersumber dari sumberdaya alam tak terbarukan (contohnya batubara). TPST Bantargebang setiap harinya mendapatkan masukan sampah baru sebesar ± 7.500 ton/hari dari seluruh wilayah Provinsi DKI Jakarta, disisi lain kondisi sampah eksisting TPST Bantargebang telah mencapai 80% dari total kapasitas yang tersedia. Komposisi sampah yang ada di TPST Bantargebang terdiri dari 33% plastik, 2% PET, 9% kain, 4% kertas, 3% karet/kulit, 39% sisa makanan, 4% kayu dan rumput, 4% sampah B3, dan 2% jenis sampah lainnya. Susunan komposisi sampah ini memiliki potensi sebagai energi alternatif pengganti energi tidak terbarukan. Menurut Elango et al., (2007) sampah dari perkotaan (*municipal solid waste/MSW*) dan limbah rumah tangga dapat menghasilkan biogas yang diolah menggunakan proses anaerobik dengan kualitas 68-72%. Setiap jenis sampah yang menyusun komposisi di atas memiliki potensi yang dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif. Bagan karakteristik dan potensi sampah TPST Bantargebang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 4. Karakteristik dan Potensi sampah di TPST Bantargebang

Berdasarkan data BPS, (2023) presentase sampah organik dari total sampah harian TPST Bantargebang sebesar 49,87%. Dengan kondisi ini sampah organik dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku biogas. Proses pembentukan biogas merupakan hasil dari tahapan yang saling terkait, yakni bahan biogas (sampah organik) terus diurai menjadi bagian yang lebih kecil oleh mikroorganisme. Proses terbentuknya biogas, ditunjukkan pada Gambar 1, yang terdiri atas empat tahapan proses utama yakni: 1) hidrolisis, 2) asidogenesis, 3) asetogenesis, dan 4) metanogenesis (Harun & Ilham, 2023). Berdasarkan penelitian Papilo et al., (1959) Pemanfaatan biomassa sebagai sumber daya listrik merupakan salah satu solusi yang dapat dikembangkan dalam rangka meningkatkan rasio elektrifikasi dan mewujudkan ketahanan energi nasional. Residu yang dihasilkan dari limbah pertanian dan perkebunan menunjukkan bahwa total energi teoritis biomassa yang dapat dihasilkan adalah sebesar 77.466.754,8 GJ/Tahun. Secara teoritis berpotensi menghasilkan energi listrik sebesar 21.518.542,8 MWh/Tahun.

Sampah dapat diubah menjadi sumber energi melalui berbagai pendekatan teknologi. Dalam konteks ini, akan dibahas empat teknologi utama yaitu pembangkit listrik tenaga sampah (*Waste-to-Energy/WTE*), pengolahan biogas, konversi sampah menjadi bahan bakar dan RDF

1. Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (WTE)

Pembangkit listrik tenaga sampah merupakan salah satu cara utama untuk mengubah sampah padat menjadi energi listrik. Prosesnya melibatkan pembakaran sampah untuk menghasilkan panas, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin yang menghasilkan listrik. Proses ini mengurangi volume sampah dan dapat menghasilkan energi bersih (Levis et al., 2010).

Penerapan pengolahan sampah perkotaan telah dilakukan di China. Dengan pertumbuhan ekonomi yang cepat dan urbanisasi besar-besaran, Cina menghadapi masalah pembuangan limbah padat perkotaan (MSW) dan kebutuhan mendesak untuk pengembangan energi alternatif. Insinerasi limbah menjadi energi (WTE), yang memulihkan energi dari MSW yang dibuang dan menghasilkan listrik dan/atau uap untuk pemanasan, diakui sebagai sumber energi terbarukan dan memainkan peran yang semakin penting dalam pengelolaan MSW di China. Artikel ini memberikan gambaran umum tentang industri WTE, membahas tantangan utama dalam memperluas insinerasi WTE di China, yaitu, biaya modal dan operasional yang tinggi, korosi peralatan, emisi polutan udara, dan pembuangan abu terbang. Perspektif tentang MSW sebagai sumber energi terbarukan di Cina juga disajikan. Saat ini, hanya sekitar 13% MSW yang dihasilkan di Cina yang dibuang di fasilitas WTE. Dengan manfaat yang signifikan dari kualitas lingkungan, pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK), dan kebijakan pemerintah serta insentif keuangan sebagai sumber energi terbarukan, industri insinerasi WTE diharapkan mengalami pertumbuhan yang signifikan dalam dekade mendatang dan memberikan kontribusi yang lebih besar dalam memasok energi terbarukan di China (S Mishchenko, A Valenti et al, 2016).

- Pengolahan Biogass

Pengolahan biogas melibatkan penguraian organik dalam sampah menjadi gas metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) melalui proses fermentasi anaerobik. Biogas ini dapat digunakan sebagai sumber energi termal atau listrik. Biogas juga dapat diolah menjadi bio-metana yang memiliki nilai lebih tinggi sebagai bahan bakar (Mata-Alvarez et al., 2014).

- Konversi Sampah menjadi Bahan Bakar

Konversi sampah menjadi bahan bakar melibatkan proses kimia atau termal untuk mengubah komponen organik dalam sampah menjadi bahan bakar seperti bio-olefin, bio-diesel, atau bahan bakar sinar matahari sintetik. Pada umumnya proses ini melibatkan teknologi seperti pirolisis atau gasifikasi. *Pilot project* PLTSa Bantargebang merupakan teknologi proses termal yang dapat memusnahkan sampah secara cepat, signifikan, dan ramah lingkungan. Bukan hanya itu, *pilot project* PLTSa yang didesain untuk beroperasi secara kontinu 24 jam/hari dan 250-300 hari/tahun, menggunakan bahan bakar sampah dengan kapasitas 100 ton/hari dan menghasilkan listrik sebesar 700 kW (DLH Provinsi DKI Jakarta, 2023). Namun sejauh ini listrik yang dihasilkan masih digunakan untuk pengoperasian internal unit PLTSa saja.

- *Refuse Derived Fuel* (RDF)

Sampah jenis lain berupa anorganik dan lainnya dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan berupa RDF dan PLTSa dengan metode insenerasi. Sampah hasil perkotaan (MSW) yang sulit untuk didaur ulang atau disortir ternyata memiliki nilai kalor yang tinggi yang dapat digunakan sebagai bahan bakar pemulihan energi. Total sampah yang dapat dihasilkan menjadi RDF = 5.472.490 kg/hari - (komponen logam + kaca) kg/hari = 5.472.490 kg/hari - (4% dari 5.472.490) kg/hari = 5.253.590,44 kg/hari = 5.253.590 kg/hari = 5.253 ton/hari atau setara dengan 5.253 ton/hari x 9357,3416 kWh/ton = 49.154.115 kWh/hari, jika efisiensi produksi listrik dari RDF adalah 25%, maka Provinsi DKI Jakarta mampu menghasilkan listrik dari RDF sebesar 12.288.529 kWh/hari atau sebanyak energi yang dibutuhkan oleh 573.480 rumah tangga kelas menengah dengan kebutuhan energi sebesar 642,84 kWh/bulan (Widyatmoko, 2018). Salah satu metode dalam pemrosesan RDF adalah *biodrying* yang merupakan salah satu bagian dari teknologi *Mechanical-Biological Treatment* (MBT) yang bertujuan untuk mengurangi kadar air sampah dengan memanfaatkan panas yang dihasilkan dari aktivitas mikroorganisme dalam mendegradasi materi organik sehingga diharapkan terjadi peningkatan nilai kalor (Chaerul et al., 2020). Standar dan parameter yang digunakan dalam menentukan kelas RDF mengacu pada SNI 8966:2021. Sampah di Bantargebang melalui RDF menghasilkan nilai kalor (*calorific value*) yang tinggi dan dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk pemulihan energi. RDF dari TPST Bantargebang saat ini telah digunakan di dua pabrik semen untuk bahan bakar, namun terdapat beberapa hal yang menjadi kelemahan RDF sebagai alternatif bahan bakar khususnya untuk sektor industri yaitu proses pengolahan sampah menjadi RDF dapat menghasilkan bahan bakar

dengan kualitas yang bervariasi. Variabilitas ini dapat menyebabkan ketidakpastian dalam penggunaan RDF sebagai bahan bakar industri dimana memerlukan bahan bakar yang konsisten dalam kualitas dan komposisi. Selain itu RDF mungkin mengandung kontaminan seperti bahan berbahaya atau material yang tidak dapat dibakar. Ini dapat menyebabkan masalah operasional di unit industri, seperti kerusakan pada peralatan pembakaran. Investasi awal dalam infrastruktur dan teknologi RDF pada umumnya tergolong mahal, oleh karena itu, perlu pertimbangan yang matang mengenai kelayakan finansial proyek RDF.

TPST Bantargebang memiliki potensi lain yang sangat tinggi dalam pemanfaatan energi yaitu energi biomassa. Kegiatan *landfill mining* menghasilkan sampah organik terdegradasi yang memiliki kandungan karbon tinggi, disebut kompos atau *humus soil*. Energi biomassa dapat menjadi sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil karena memiliki sifat yang dapat diperbarui (*renewable resources*). Sumber energi ini relatif tidak mengandung unsur sulfur sehingga tidak menyebabkan polusi udara. Biomassa yang terbentuk dari *landfill* sumbernya sangat berlimpah dan akan semakin bertambah seiring dengan perkembangan penduduk, pemukiman, dan perumahan serta pemenuhan kebutuhan warga DKI Jakarta yang juga terus berkembang. Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk mengkonversi biomassa tersebut menjadi bahan bakar adalah teknologi *briquetting* (briket). Melalui proses pengompakkan menjadi briket, kandungan karbon akan semakin tinggi dan dapat meningkatkan nilai kalori dari kompos mentah. Kompos dapat dibakar dan listrik kemudian dapat dihasilkan dengan memanfaatkan uap super panas yang dihasilkan melalui pembangkit uap pemulihan panas (Williams et al., 2001).

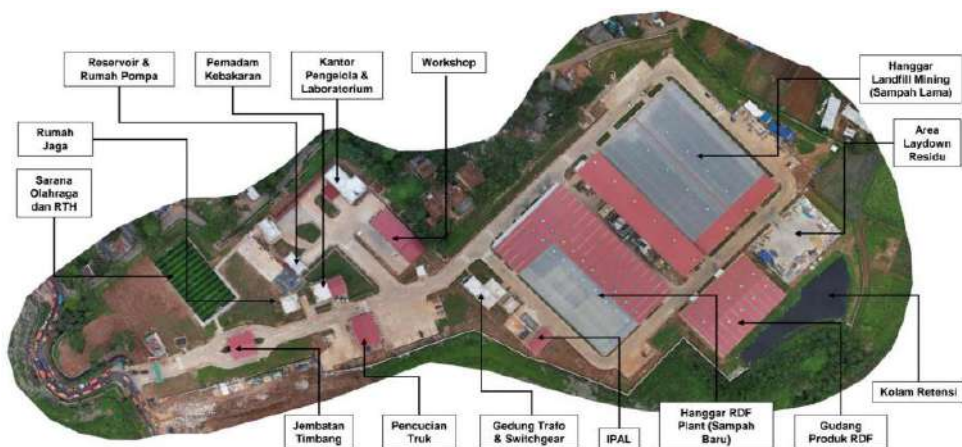
Berdasarkan latar belakang tersebut maka perlu dilakukan penelitian terkait potensi RDF sebagai sumber energi terbarukan serta perbandingannya dengan bahan bakar fosil (batubara) dalam mensubsitisi kebutuhan energi di Indonesia dan khususnya DKI Jakarta.

2.2. Metode Penelitian

Metode penelitian ini akan membantu peneliti dalam memahami konteks, kerangka teoritis, serta data-data yang relevan untuk mendukung argumentasi dan temuan dalam penelitian.

2.2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian Potensi *RDF* sebagai sumber energi terbarukan dibandingkan dengan batubara akan dilaksanakan pada bulan November 2023 – April 2024. Lokasi penelitian akan dilaksanakan *RDF Plant* di TPST Bantargebang (Gambar 4.).



Gambar 5. Peta Lokasi Penelitian

2.2.2. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan pada penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer merupakan data yang diperoleh dari pengambilan sampel secara langsung di lapangan. Metode pengambilan sampel pada penelitian ini menggunakan *random sampling method*. Pengambilan sampel sampah dilakukan secara acak pada hanggar *landfill mining* dan hanggar RDF Plant, sedangkan sampel RDF diambil secara acak dari gudang produk RDF. Jumlah sampel yang akan diambil sebanyak 5 sampel dari masing-masing hanggar *landfill mining*, hanggar RDF Plant, dan gudang produk RDF. Frekuensi pengulangan pengambilan sampel dilakukan sebanyak 3 kali dengan interval 2 hari.

Sampel yang telah dikumpulkan akan dianalisa di laboratorium dengan parameter yang merujuk pada SNI 8966:2021 yaitu parameter material organik, kandungan energi *netto*, kandungan karbon, kandungan zat mudah menguap, kadar air, kadar abu, total sulfur, klorin, merkuri, kalium dan titik leleh abu. Selain itu, sampel juga akan dianalisa kandungan logam berat dan pestisida dengan metode TCLP yang meliputi parameter arsen, barium, cadmium, krom valensi enam, tembaga, timbal, merkuri, molybdenum, nikel, selenium, perak, aldrin dan dieldrin.

Data sekunder merupakan data yang diperoleh dari literatur, instansi terkait dan laporan-laporan terdahulu. Selain itu, data sekunder yang digunakan adalah data yang telah ada sebelumnya dan dikumpulkan oleh pihak lain, seperti data statistik, laporan pemerintah, dan hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan karakteristik dan potensi sampah *landfill* dan sampah baru di TPST Bantargebang (kuantitas fisik dan kualitas kimiawi). Data sekunder pada penelitian ini bersumber dari DLH Provinsi DKI Jakarta, UPT TPST Bantargebang, studi literatur/jurnal ilmiah dan Badan Pusat Statistik.

1.2.2. Analisis Laboratorium

Analisis laboratorium yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari analisis nilai kalor, *analisis proximat*, dan analisis *Toxicity Characteristic Leaching Procedure*

(TCLP) dan pestisida. Analisis nilai kalor merupakan pengukuran dan perhitungan nilai kalor atau nilai energi yang terkandung dalam suatu substansi atau bahan bakar. Nilai kalor mengukur jumlah energi yang dilepaskan atau disimpan dalam bahan saat bahan tersebut dibakar atau dimanfaatkan sebagai sumber energi. Pada penelitian ini analisis nilai kalor bertujuan untuk menghitung nilai kalor yang dihasilkan oleh pembakaran RDF. *Analisis proximat* merupakan analisis yang digunakan untuk mengukur komposisi kimia kasar atau komponen utama dalam sampel bahan organik, terutama bahan bakar seperti batubara, kayu, makanan, dan bahan organik lainnya. *Analisis proximat* pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kadar air, kadar abu, bahan organik yang mudah terbakar, *fixed carbon* dan hydrogen pada bahan bakar jumputan padat.

Analisis TCLP dan pestisida merupakan metode pengujian standar yang digunakan untuk menentukan apakah suatu sampel limbah padat atau berbahaya dianggap sebagai limbah berbahaya berdasarkan potensi kelarutannya dalam air dan tingkat toksisitasnya. Parameter yang akan dianalisis menggunakan TCLP terdiri dari parameter arsen, barium, cadmium, kromium, kadmium, tembaga, timbal, merkuri, molybdenum, nikel, selenium, perak, aldrin dan dieldrin serta parameter pestisida yang terdiri dari DDT (*Dichlorodiphenyltrichloroethane*) + DDD (*Dichlorodiphenyldichloroethane*) + DDE (*Dichlorodiphenyldichloroethylene*), 2,4-D (*Asam 2,4-Diklorofenoksiasetat*)).

2.2.3. Analisis Data

Analisis data merupakan proses sistematis untuk mengorganisasi, menginterpretasikan, dan menyajikan data sehingga dapat diambil kesimpulan atau informasi yang berguna. Analisis data yang digunakan pada penelitian merupakan perbandingan hasil pengukuran parameter *RDF* dengan standar SNI 8966:2021 RDF untuk Pembangkit Listrik. Sedangkan untuk parameter logam berat dan pestisida menggunakan Lampiran XII Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021.

Analisis data eksternal dalam penelitian ini mencakup analisis perbandingan secara substantif, yang meliputi parameter-parameter yang diukur serta dampak yang dihasilkan dari penggunaan RDF dibandingkan dengan batubara. Dalam konteks ini, parameter yang diperhatikan mencakup nilai kalor, kadar air, dan kadar abu, yang semuanya berpengaruh langsung terhadap efisiensi energi dan dampak lingkungan dari kedua sumber energi tersebut.

Hasil analisis akan disajikan dalam bentuk tabel, grafik, dan diagram secara deskriptif, yang bertujuan untuk memberikan gambaran yang jelas dan komprehensif tentang informasi yang diperoleh dari penelitian ini. Penyajian data dalam format visual ini penting untuk memudahkan pemahaman dan interpretasi hasil, serta membantu dalam mengidentifikasi pola dan tren yang relevan. Misalnya, grafik perbandingan nilai kalor antara RDF dan batubara dapat menunjukkan seberapa efisien RDF sebagai sumber energi alternatif.

Sebagai referensi, studi oleh Themelis dan Recyclet (2016) menunjukkan bahwa RDF dapat memiliki nilai kalor yang kompetitif dibandingkan batubara,

tergantung pada komposisi sampah yang digunakan. Selain itu, penelitian oleh Bhatia et al. (2020) mengindikasikan bahwa penggunaan RDF dapat menghasilkan emisi yang lebih rendah dibandingkan dengan batubara, terutama dalam konteks pengurangan emisi CO₂ dan partikel halus. Dengan demikian, analisis ini tidak hanya berfungsi untuk membandingkan kinerja energi dari kedua bahan bakar tetapi juga menilai dampak lingkungan yang dihasilkan.

Melalui pendekatan analisis yang komprehensif ini, penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang berharga untuk pengembangan kebijakan dan praktik terbaik dalam pemanfaatan RDF sebagai alternatif energi yang lebih berkelanjutan. Data yang diperoleh dapat menjadi dasar untuk merumuskan strategi yang lebih efektif dalam pengelolaan limbah dan pengembangan energi terbarukan di masa depan.

2.3. Hasil dan Pembahasan Penelitian

TPST Bantargebang saat ini menerapkan sistem pengelolaan sampah *sanitary landfill*, namun sistem ini belum dijalankan sepenuhnya karena keterbatasan lahan, sarana, dan prasarana, seperti kurangnya tanah merah untuk menutupi area *laydown*. Sampah yang dibuang di TPST Bantargebang memiliki potensi untuk dimanfaatkan yaitu; 1) pemanfaatan energi sampah (*WTE*) sebanyak 50-100 ton/hari menjadi listrik di PLTSa berkapasitas 750 kWh, listrik yang dihasilkan akan dijual ke PLN; 2) pemanfaatan gas *methane* dari *landfill* dengan kapasitas 50-100 m³ gas metan per ton sampah, energi ini digunakan sebagai pembangkit Listrik di area TPST Bantargebang; 3) pengolahan sampah dengan produk RDF sebagai bahan bakar industri semen dan lainnya. Berdasarkan hal tersebut di atas, maka TPST Bantargebang memiliki potensi untuk menghasilkan energi terbarukan untuk menggantikan energi fosil yang diperkirakan akan mengalami krisis pada tahun 2086 di Indonesia dan juga membantu mengurangi volume sampah di TPST Bantargebang dan mengurangi emisi gas rumah kaca serta dampak lingkungan dari pembuangan sampah yang tidak terkelola dengan baik. Pembahasan selanjutnya akan terfokus pada potensi sampah sebagai produk RDF.

2.3.1. Nilai Kalor Sampah

Sampah yang berpotensi menjadi energi terbarukan mengandung fraksi-fraksi yang mudah terbakar dan memiliki nilai kalor tinggi seperti plastik, kertas, tekstil, dan kayu (Paper, 2024). Sampah di TPST Bantargebang memiliki potensi energi kalor yang cukup baik yang bersumber dari sampah MSW dan *landfill mining*. Berdasarkan hasil pengukuran, diperoleh potensi energi yang disajikan pada Tabel 2 sebagai berikut;

Tabel 2 Pengukuran Bahan Baku Sampah di TPST Bantargebang

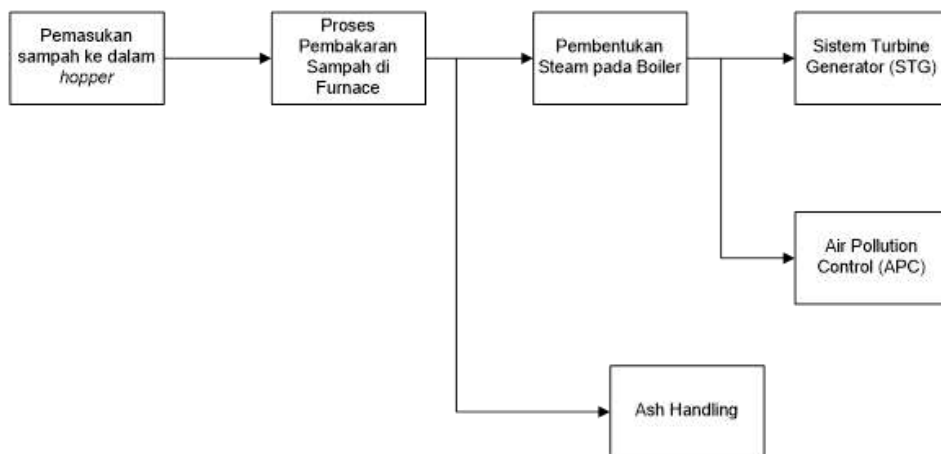
PARAMETER	SATUAN	SAMPAH MSW	SAMPAH LANDFILL MINING
Kadar Air	%	56	29
Kadar Abu	%	38	21
Mudah menguap	%	42,5	45
Total Karbon	%	28,4	24,5
Total Organik	%	69,2	82,1
Total Sulfur	%	0,39	0,11
Klorin	%	0,018	0,014
Merkuri	mg/L	< 0,0005	< 0,0005
Kalium	%	9,5	6,4
Titik Leleh Abu	%	1,22	1,04
Nilai Kalor	Kcal/kg	1.943,96	2.415,98

Berdasarkan Tabel 2, analisis terhadap sampah domestik (MSW) dan sampah dari *landfill mining* menunjukkan bahwa nilai kalor dari kedua jenis sampah ini dipengaruhi secara signifikan oleh kadar air yang terkandung di dalamnya. Hubungan antara kadar air dan nilai kalor bersifat berbanding terbalik, di mana semakin tinggi kadar air, semakin rendah nilai kalor yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, nilai kalor sampah MSW tercatat sebesar 1.943 Kkal/gr dengan kadar air mencapai 56%, sementara nilai kalor sampah landfill mining lebih tinggi, yaitu 2.415 Kkal/gr, dengan kadar air hanya 29%. Temuan ini sejalan dengan pernyataan Kurniawan et al. (2012), yang menegaskan bahwa kadar air memiliki dampak signifikan terhadap nilai kalor bahan bakar padat. Semakin rendah kadar air dalam sampah, semakin tinggi nilai kalornya, yang menjadikannya lebih efisien sebagai sumber energi. Hal ini menunjukkan pentingnya pengelolaan kadar air dalam proses pengolahan sampah untuk meningkatkan potensi energi yang dapat diperoleh dari sampah tersebut. Penelitian terbaru oleh Syafrudin et al. (2023) juga mendukung temuan ini, menyatakan bahwa pengurangan kadar air dalam material organik sebelum proses pembakaran dapat meningkatkan efisiensi energi hingga 30%. Dengan demikian, pengelolaan kadar air yang efektif dalam sampah dapat berkontribusi pada peningkatan nilai kalor dan efisiensi konversi energi, yang sangat penting dalam konteks pengelolaan sampah dan pemanfaatan energi terbarukan. Oleh karena itu, upaya untuk meminimalkan kadar air dalam proses pengolahan RDF harus menjadi perhatian utama bagi para pengelola TPST. Dengan meningkatkan nilai kalor dari RDF yang dihasilkan, akan ada potensi lebih besar untuk memanfaatkan energi dari sampah sebagai alternatif yang berkelanjutan, mendukung transisi energi bersih dan upaya mitigasi perubahan iklim.

Berdasarkan komposisi sampah domestik (MSW), potensi nilai kalor yang dapat dihasilkan dapat dianalisis dengan mempertimbangkan berbagai jenis material yang terdapat dalam sampah tersebut. Komposisi sampah MSW di DKI Jakarta terdiri dari 49,87% sampah organik yang mudah terurai, 17,24% kertas, 3,18% kayu, 1,48% kaca, 1,08% logam, 0,90% kain, 0,78% masker, 0,70% kulit, dan 0,42% sampah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) domestik. Setiap jenis sampah memiliki nilai kalor yang berbeda-beda, yang sangat bergantung pada komposisi dan sifat

materialnya. Asumsi nilai kalor yang dihasilkan berdasarkan masing-masing jenis sampah adalah sebagai berikut: sampah organik memiliki nilai kalor antara 1.500-2.500 Kkal/Kg, plastik berkisar antara 6.000-9.000 Kkal/Kg, kertas antara 3.000-4.500 Kkal/Kg, dan kayu serta material berbasis kayu antara 4.000-5.000 Kkal/Kg (Themelis, 2003; Christensen, 2011; Williams, 2005; Diaz et al., 1996; Kreith & Tchobanoglous, 2002).

Secara prinsip, proses sampah menjadi energi listrik dilakukan melalui proses pembakaran langsung ataupun tidak langsung. Ada beberapa jenis konversi yang sampah menjadi energi yaitu *thermochemical*, *physicochemical*, atau *biochemical* (Nizami et al., 2017; Ali et al., 2020). PLTSa Bantargebang merupakan instalasi pengolah sampah menggunakan sistem termal dengan teknologi insinerasi dengan kapasitas 50-100 ton/hari. Suhu pembakaran dalam tungku mencapai lebih dari 850°C tanpa bahan bakar tambahan dengan *output* listrik ± 750 kWh. Diagram alir proses produksi PLTSa Bantargebang disajikan pada gambar berikut.



Gambar 6. Diagram Alir Produksi PLTSa Bantargebang

Gambar 5 menunjukkan proses produksi PLTSa Bantargebang, kebutuhan sampah untuk *startup* adalah ± 7 ton. Berdasarkan diagram alir residu yang dihasilkan berupa *bottom ash* (± 86 ton) dan *fly ash* (49 sak) yang akan dimanfaatkan kembali *offtaker* untuk kebutuhan pertanian.

2.3.2. Potensi Sampah Sebagai Produk RDF

Selain pemanfaatan energi dari sampah melalui proses insinerasi, TPST Bantargebang juga telah mengembangkan kemampuan pengolahan sampah domestic dari perkotaan (MSW) dan sampah *landfill mining* di RDF Plant sejak tahun 2023. Teknologi ini merupakan langkah penting dalam pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan dan efisien, yang sejalan dengan upaya pemerintah untuk mengurangi timbunan sampah di Jakarta.

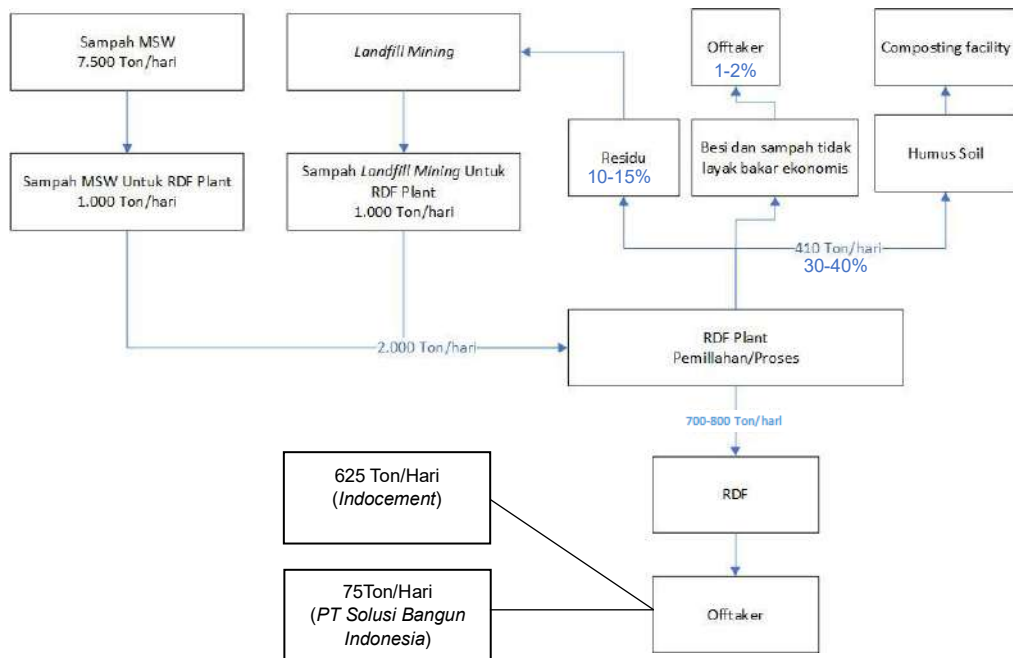
Menurut Damanhuri & Padmi (2019), RDF adalah produk bahan bakar yang dihasilkan dari proses pencacahan dan pengolahan sampah yang mudah terbakar,

disertai dengan pengurangan kadar air. Proses pengolahan yang diterapkan di RDF *Plant* melibatkan serangkaian tahapan mekanis yang dirancang untuk memaksimalkan kualitas dan kuantitas bahan bakar yang dihasilkan. Proses ini dimulai dengan *shredder*, yang berfungsi untuk mencacah sampah menjadi ukuran yang lebih kecil, sehingga memudahkan proses selanjutnya.

Selanjutnya, sampah yang telah dicacah melewati *trommel screen*, alat yang digunakan untuk memisahkan material berdasarkan ukuran, sehingga memisahkan fraksi yang lebih besar dari yang lebih kecil. Setelah itu, *magnetic separator* digunakan untuk menghilangkan benda-benda logam dari campuran, yang penting untuk meningkatkan kualitas RDF dan mengurangi potensi kerusakan pada peralatan pengolahan. Proses selanjutnya adalah *wind shifter*, yang memisahkan material berdasarkan berat, memudahkan pemisahan bahan yang lebih ringan seperti plastik dan bahan organik.

Setelah proses pemisahan, material kemudian dikeringkan dalam *sun dry bay* untuk mengurangi kadar air sebelum masuk ke *kiln dryer* untuk proses pengeringan lebih lanjut menggunakan panas untuk mencapai kadar air yang optimal bagi produksi RDF. Proses ini diakhiri dengan *drying conveyor*, yang mengantarkan material RDF siap pakai ke tahap berikutnya.

Implementasi teknologi RDF ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pengolahan sampah tetapi juga memberikan alternatif energi yang lebih bersih. Sebuah studi oleh Zhang et al. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan RDF sebagai sumber energi dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dibandingkan dengan pembakaran langsung sampah. Dengan demikian, RDF *Plant* berpotensi untuk berkontribusi secara signifikan terhadap pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan di DKI Jakarta. Proses pengolahan sampah MSW dan sampah *landfill mining* disajikan pada Gambar 6.



Gambar 7. Pengolahan RDF Dari Sampah MSW

Kapasitas pengolahan sampah MSW dan sampah *landfill mining* masing-masing terdiri atas 1.000 ton/hari, sehingga totalnya adalah 2.000 ton/hari dengan hasil produksi harian RDF minimal 700 ton/hari dengan ukuran partikel RDF 50 mm. Hasil analisis yang dilakukan pada sampel RDF dari sampah MSW dan sampah *landfill mining* disajikan pada Tabel 4.

Tabel 3. Hasil Pengukuran RDF dari Sampah MSW dan *Landfill Mining*

PARAMETER	SATUAN	KELAS 1*	KELAS 2*	KELAS 3*	RDF MSW	RDF LM
Kadar Air	%	15	20	25	20	16
Kadar Abu	%	15	20	25	16	10.2
Peguapan	%	65	70	75	46.5	43.6
Karbon Total	%	15	10	5	12.2	28.8
Organik Total	%	95	87,5	80	89,4	89.5
Sulfur Total	%	1,5	2	1,5	1.2	0.55
Klorin	%	0,2	1	1,0	0.8	0.03
Raksa	mg/L	0,02	0,03	0,08	0.0002	< 0.0005
Kalium	%	5	10	15	2.6	5.3
Titik Lebur Abu	%	1.200	1,180	1.180	1.5	1.09
Nilai Kalor	Kcal/kg	4.765,7	3.574,27	2.382,85	2.962	4.289,6

Keterangan *) Baku mutu SNI 8966 Tahun 2021

Tabel 4 menunjukkan RDF dari sampah MSW memenuhi baku mutu Kelas 3 dan RDF dari sampah *landfill mining* memenuhi baku mutu kelas 2 untuk pembangkit Listrik.

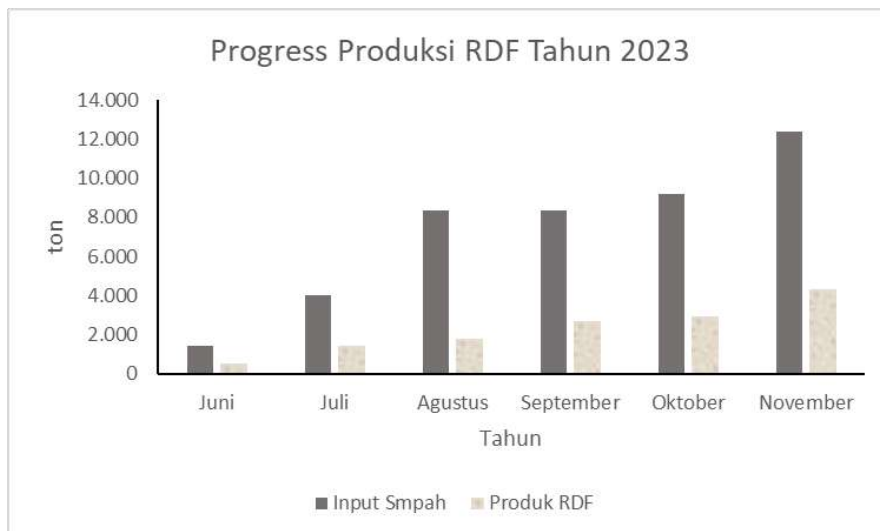
2.3.3. Potensi RDF Dalam Bentuk *Fluffy*

Saat ini, RDF *Plant* Bantargebang memproduksi RDF dalam bentuk *fluffy*. Pemilihan produk RDF dalam bentuk *fluffy* disebabkan oleh densitasnya yang rendah, yang memungkinkan untuk menghasilkan volume yang besar, sehingga lebih mudah dalam proses pengangkutan. Bentuk *fluffy* ini juga memberikan keuntungan dalam efisiensi pembakaran, karena memiliki luas permukaan yang lebih besar, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi sistem pembakaran. Kaltschmitt et al. (2013) menjelaskan bahwa material dengan struktur yang lebih ringan dan berpori dapat meningkatkan laju reaksi pembakaran, sehingga menghasilkan energi yang lebih optimal.

Produk RDF dalam bentuk *fluffy* sesuai dengan perjanjian kerjasama antara Dinas Lingkungan Hidup DKI Jakarta dengan offtaker industri semen, PT Indocement Tunggul Prakarsa akan memanfaatkan RDF sebesar 625 ton/hari dan PT Solusi Bangun Indonesia akan memanfaatkan RDF sebesar 75 ton/hari. Penggunaan RDF sebagai bahan bakar alternatif dalam industri semen ini sangat relevan, mengingat sektor ini seringkali membutuhkan energi tinggi dalam proses produksinya. Hal ini sejalan dengan pernyataan Chatziaras et al. (2015), yang menunjukkan bahwa dalam beberapa tahun terakhir, banyak industri semen mulai memanfaatkan energi panas dari pembakaran RDF sebagai upaya untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya.

Selain itu, pemanfaatan RDF dalam industri semen juga berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca, yang menjadi salah satu target utama dalam upaya keberlanjutan. Penelitian oleh Bhuvaneswari et al. (2022) menyoroti bahwa adopsi bahan bakar alternatif seperti RDF dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 30% dibandingkan dengan penggunaan bahan bakar konvensional. Dengan demikian, kolaborasi antara RDF *Plant* dan industri semen tidak hanya mendukung pemanfaatan limbah, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan dampak lingkungan, selaras dengan tujuan pembangunan berkelanjutan.

Jumlah sampah yang diolah pada RDF *Plant* pada bulan Juni-November 2023 mencapai 40.705 ton dan jumlah produk RDF dalam bentuk *fluffy* yang dihasilkan mencapai 13.785 ton. Dengan demikian presentase produksi adalah 33 %. Progres produksi RDF disajikan pada Gambar 7.



Gambar 8. Progres produksi RDF Bentuk Fluffy Tahun 2023

Gambar 7 menunjukkan peningkatan input sampah tertinggi pada bulan November 2023 yaitu 12.411 ton dengan produk yang dihasilkan 4.344 ton (35%) dan terendah pada bulan Juni 2023 yaitu 1.460 ton dengan hasil produk 534 ton (36%), hal ini disebabkan pada bulan Juni 2023 merupakan waktu produksi pertama setelah proses *commissioning* RDF Plant. Pada tingkat *off taker*, dilakukan pengujian laboratorium untuk parameter kadar air dan nilai kalor terdapat produk RDF bulan Juni hingga November 2023. Hasil pengukuran produk RDF yang diterima offtaker dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kualitas Produk RDF Bentuk Fluffy Yang Diterima Off Taker

BULAN TAHUN 2023	PARAMETER	
	KADAR AIR (%)	NILAI KALOR (KCAL/KG)
	MAKS 20%*	MIN. 3.400*
Juni	24,57	4.908,61
Juli	26,40	4.171,05
Agustus	34,19	3.615,45
September	29,08	3.734,95
Oktober	31,60	3.822,96
November	34,93	4.156,83
RATA RATA	30,12	4.068, 31

Sumber: Data sekunder, 2023

Keterangan: *) Baku mutu industri semen (*off taker*)

2.3.4. Potensi Refuse Derived Fuel (RDF) Dalam Bentuk Briket

Briket adalah bahan bakar padat yang terbuat dari biomassa atau bahan bakar fosil yang telah dikompresi menjadi bentuk tertentu untuk kemudahan penggunaan dan transportasi. Penggunaan briket telah menjadi semakin populer sebagai alternatif sumber energi yang ramah lingkungan karena dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan memanfaatkan limbah biomassa yang biasanya tidak terpakai. Briket biomassa biasanya terbuat dari sisa-sisa pertanian seperti sekam

padi, serbuk gergaji, jerami, dan tempurung kelapa. Penggunaan briket biomassa memiliki beberapa keunggulan, termasuk ketersediaan bahan baku yang melimpah, biaya produksi yang relatif rendah, dan potensi untuk mengurangi deforestasi dengan menggantikan kayu bakar. Menurut Grover dan Mishra (1996), briket biomassa memiliki nilai kalor yang cukup tinggi dan dapat digunakan sebagai alternatif energi terbarukan yang efisien. Studi oleh Kaliyan dan Morey (2009) menunjukkan bahwa densitas dan kadar air briket sangat mempengaruhi kinerja pembakaran dan efisiensi energi yang dihasilkan.

A. Standar Briket

Untuk memastikan kualitas dan konsistensi briket, terdapat beberapa standar yang telah ditetapkan oleh berbagai badan standar internasional dan nasional. Dua di antaranya adalah Standar Nasional Indonesia (SNI) dan *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

1. Standar Nasional Indonesia (SNI); di Indonesia, standar briket diatur Badan Standarisasi Nasional (BSN) melalui SNI yang mencakup berbagai aspek, sebagai berikut:
 - a. Kadar air maksimum adalah 15% (BSN, 2016) yang akan meningkatkan efisiensi pembakaran dan nilai kalor.
 - b. Kadar abu maksimum yang diizinkan adalah 8% (BSN, 2016). Kadar abu yang rendah mengurangi residu pembakaran dan meningkatkan efisiensi penggunaan energi.
 - c. Nilai kalor minimum ± 4.000 kcal/kg (BSN, 2016). Nilai kalor tinggi menunjukkan jumlah energi yang lebih besar yang dapat dihasilkan dari pembakaran.
 - d. Densitas dapat diatur untuk memastikan kepadatan yang cukup agar mudah ditangani dan dibakar secara efisien.
2. *America Society for Testing and Materials* (ASTM)
 - a. Kadar air maksimum adalah 10% (ASTM, 2018). Kadar air yang lebih rendah dari standar SNI ini menunjukkan fokus pada efisiensi pembakaran yang lebih tinggi.
 - b. Kadar abu maksimum sekitar 6% (ASTM, 2018). Kadar abu yang lebih rendah meningkatkan kualitas pembakaran dan mengurangi residu.
 - c. Nilai kalor minimum sekitar 4.500 kcal/kg (ASTM, 2018), yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan standar SNI, menunjukkan perhatian pada efisiensi energi yang lebih besar.
 - d. Densitas dan ketahanan terhadap kerusakan selama penanganan dan transportasi, memastikan briket tetap dalam bentuk yang diinginkan hingga saat digunakan.

2.3.4.1. Hasil Pengukuran Kualitas Briket

Briket adalah bahan bakar padat yang terbuat dari material organik yang telah dikompres menjadi bentuk yang lebih padat dan mudah dibakar. Penggunaan briket menjadi alternatif yang menjanjikan untuk bahan bakar fosil karena

kemampuannya untuk mengurangi limbah dan emisi gas rumah kaca. Dalam penelitian ini, akan membandingkan briket yang dihasilkan dari berbagai bahan baku, yaitu arang sampah RDF, arang serat sawit, dan batubara muda, serta kombinasi dari ketiganya.

Penerapan standar seperti SNI dan ASTM sangat penting untuk memastikan kualitas, efisiensi, dan konsistensi briket yang diproduksi. Standar ini membantu produsen dalam menciptakan produk RDF bentuk briket yang dapat diandalkan dan memenuhi kebutuhan energi yang berkelanjutan. Dengan mengikuti standar ini, penggunaan briket dapat menjadi solusi yang lebih ramah lingkungan dan efisien dibandingkan dengan bahan bakar fosil konvensional. Adapun data-data hasil penelitian ditampilkan dari Tabel 12 sampai Tabel 19. Berdasarkan Tabel 12 menunjukkan kadar air briket sebesar 8,6% dan kadar abu sebesar 28,4%. Menurut McDougall (2001), keunggulan penggunaan RDF dalam bentuk briket sebagai bahan bakar memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampah MSW, sehingga pemulihan energi menjadi lebih tinggi. Selain itu, RDF dalam bentuk briket mengandung sedikit *non-combustible* material dibandingkan sampah MSW, sehingga abu yang dihasilkan lebih sedikit daripada sampah MSW, dan hal ini menyebabkan pembakaran dapat lebih terkontrol. Nilai kalor RDF dalam bentuk briket dalam penelitian ini sebesar 1.876,5 kcal/kg.

Kadar air dalam briket RDF memiliki pengaruh signifikan terhadap energi yang digunakan dalam proses pembakaran. Briket RDF dengan kadar air yang rendah dapat mempercepat proses pembakaran, karena lebih banyak energi yang dapat dilepaskan dalam waktu yang lebih singkat. Sebaliknya, briket RDF dengan kadar air yang tinggi cenderung memperlambat proses pembakaran dan meningkatkan energi yang dibutuhkan untuk mencapai suhu pembakaran yang optimal. Hal ini menunjukkan pentingnya kontrol kadar air dalam produksi briket RDF untuk memastikan efisiensi energi yang maksimal.

Di sisi lain, kadar abu dalam briket RDF mencerminkan jumlah material yang tidak terbakar setelah terjadinya pembakaran sempurna. Kadar abu merupakan parameter penting dalam briket RDF karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi pembakaran. Menurut UNEP (2006), kadar abu yang tinggi dapat mengakibatkan penumpukan residu di dalam tungku pembakaran, yang dapat mengurangi efisiensi dan meningkatkan frekuensi pemeliharaan alat. Oleh karena itu, pengendalian kadar abu sangat krusial dalam produksi briket RDF untuk memastikan bahwa sebagian besar material terbakar dengan efisien.

Harjanti dan Anggraini (2020) menekankan bahwa untuk mencapai nilai kalor yang optimal, bahan baku sampah yang digunakan harus dikondisikan dalam keadaan baik. Pengondisian ini meliputi pengeringan dan pemilahan material yang sesuai untuk memastikan bahwa briket RDF yang dihasilkan memiliki kadar air dan abu yang minimal. Penelitian yang dilakukan oleh Rithy et al. (2017) menunjukkan bahwa briket RDF yang terbuat dari campuran sampah plastik dan sampah organik memiliki nilai kalor yang cukup tinggi, yaitu sebesar 5.725 cal/g. Hasil ini menunjukkan potensi besar dari penggunaan campuran material dalam memproduksi briket RDF yang efisien dan berkualitas tinggi.

Lebih lanjut, studi oleh Santoso et al. (2023) menegaskan bahwa pemilihan bahan baku yang tepat dan pengelolaan kadar air serta kadar abu yang baik dapat meningkatkan nilai kalor briket RDF hingga 30%. Dengan demikian, penelitian dan pengembangan dalam teknologi produksi briket RDF harus difokuskan pada optimasi parameter-parameter ini untuk memastikan bahwa RDF dapat bersaing dengan sumber energi konvensional, serta memberikan kontribusi positif terhadap pengelolaan limbah dan energi terbarukan.

Tabel 5. Analisa Arang Sampah RDF Dalam Bentuk Bubuk Halus

NO	PARAMETER	UNIT	HASIL	METODE
1	Kadar Air	%	8,6	Gravimetric
2	Kadar Abu	%	28,4	Gravimetric
3	Nilai Kalori	kcal/kg	1876,5	ASTM D240 (2009)
4	Kalium	mg/kg	0,59	NH Assetat IN PH7
5	Natrium	mg/kg	0,66	NH Assetat IN PH7
6	Litium	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
7	Magnesium	mg/kg	0,82	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
8	Silika	mg/kg	0,53	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
9	Aluminium	mg/kg	1,2	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
10	Raksa	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
11	Kadmium	mg/kg	1,1	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
12	Tembaga	mg/kg	1,8	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
13	Perak	mg/kg	0,64	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
14	Nikel	mg/kg	0,85	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
15	Timbal	mg/kg	1,01	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
16	Arsen	mg/kg	0,8	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
17	Kromium	mg/kg	1,7	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
18	Timah	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
19	Seng	mg/kg	1,6	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
20	Mangan	mg/kg	0,8	ASTM D6357-11 (ICP-OES)

Briket arang sampah adalah bentuk bahan bakar alternatif dari bahan organik sisa seperti limbah rumah tangga, limbah pertanian, atau limbah industri. Proses ini tidak hanya membantu dalam mengelola limbah tetapi juga menghasilkan sumber energi yang ramah lingkungan. Hasil pada Tabel 13 menunjukkan hasil analisis briket RDF dari arang sampah memiliki nilai kalori sebesar 2566,2 kcal/kg. Nilai kalor briket RDF arang sampah dipengaruhi jenis dan komposisi limbah, proses karbonasi, bahan pengikat, kepadatan briket, dan kualitas pembakaran. Kadar air dalam briket RDF arang sampah sebesar 5,2% dan kadar abunya sebesar 28,6%. Menurut Kambey et.al, 2022, kadar air dan kadar abu dalam briket dapat mempengaruhi nilai kalor dengan faktor yang mempengaruhi karakteristik adalah laju pembakaran, yang menunjukkan nilai kalori tertinggi.

Tabel 6. Hasil Analisa Briket dari Arang Sampah RDF

NO	PARAMETER	UNIT	HASIL	METODE
1	Kadar Air	%	5,2	Gravimetric
2	Kadar Abu	%	28,6	Gravimetric
3	Nilai Kalori	kcal/kg	2566,2	ASTM D240 (2009)
4	Kalium	mg/kg	0,69	NH Assetat IN PH7
5	Natrium	mg/kg	0,84	NH Assetat IN PH7

NO	PARAMETER	UNIT	HASIL	METODE
6	Litium	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
7	Magnesium	mg/kg	1,35	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
8	Silika	mg/kg	0,76	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
9	Aluminium	mg/kg	1,26	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
10	Raksa	mg/kg	0,005	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
11	Kadmium	mg/kg	1,1	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
12	Tembaga	mg/kg	1,85	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
13	Perak	mg/kg	1,2	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
14	Nikel	mg/kg	1,05	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
15	Timbal	mg/kg	0,74	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
16	Arsen	mg/kg	1,84	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
17	Kromium	mg/kg	0,66	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
18	Timah	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
19	Seng	mg/kg	0,64	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
20	Mangan	mg/kg	0,82	ASTM D6357-11 (ICP-OES)

Berdasarkan Tabel 7 analisis batubara muda dalam bentuk bubuk halus yang memiliki nilai kalori 4689,5 kcal/kg, dengan kadar air 3,1% dan kadar abu 24,6%. Menurut penelitian yang dilakukan Tambaria dan Serli (2019) nilai kalori batubara muda bervariasi 4.000 cal/gr - 5.900 cal/gr. Batubara muda berbentuk halus memberikan permukaan kontak yang lebih luas dengan udara selama pembakaran, sehingga meningkatkan efisiensi pembakaran dan menghasilkan energi yang lebih cepat, namun, hal ini juga dapat menyebabkan pembakaran yang kurang efisien jika tidak dikendalikan dengan baik. Proses penghalusan sering kali melibatkan pengeringan untuk mengurangi kandungan air. Pengurangan kadar air dapat meningkatkan nilai kalor batubara muda. Bentuk halus lebih mudah ditangani dan diangkut, serta dapat dicampur dengan bahan bakar lain untuk meningkatkan nilai kalor total campuran.

Tabel 7. Analisa Batubara Muda Dalam Bentuk Bubuk Halus

NO	PARAMETER	UNIT	HASIL	METODE
1	Kadar Air	%	3,1	Gravimetric
2	Kadar Abu	%	24,6	Gravimetric
3	Nilai Kalori	kcal/kg	4689,5	ASTM D240 (2009)
4	Kalium	mg/kg	0,81	NH Asetat IN PH7
5	Natrium	mg/kg	0,69	NH Asetat IN PH7
6	Litium	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
7	Magnesium	mg/kg	0,85	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
8	Silika	mg/kg	1,25	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
9	Aluminium	mg/kg	0,76	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
10	Raksa	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
11	Kadmium	mg/kg	0,70	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
12	Tembaga	mg/kg	1,12	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
13	Perak	mg/kg	0,8	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
14	Nikel	mg/kg	1,02	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
15	Timbal	mg/kg	1,45	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
16	Arsen	mg/kg	0,33	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
17	Kromium	mg/kg	1,7	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
18	Timah	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
19	Seng	mg/kg	1,8	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
20	Mangan	mg/kg	0,88	ASTM D6357-11 (ICP-OES)

Tabel 9 menunjukkan hasil analisis briket dari batubara muda memiliki nilai kalori 4.939,5 kcal/kg, dengan kadar air 3% dan kadar abu 25,6%. Batubara muda atau disebut juga *lignit*, memiliki kandungan air yang tinggi, yang dapat mengurangi nilai kalornya. Air dalam batubara menyerap sebagian energi yang dihasilkan selama pembakaran, sehingga mengurangi efisiensi energi yang dilepaskan. Batubara muda biasanya memiliki kandungan zat volatil yang tinggi, yang dapat meningkatkan nilai kalor karena mudah terbakar dan melepaskan energi. Meskipun batubara muda memiliki kandungan karbon yang lebih rendah dibandingkan batubara yang lebih tua seperti antrasit, karbon tetap menjadi komponen utama yang menentukan nilai kalor batubara. Karbon yang terbakar menghasilkan panas, sehingga semakin tinggi kandungan karbon, semakin tinggi nilai kalornya. Abu adalah *residu non-combustible* yang tersisa setelah batubara dibakar. Kandungan abu yang tinggi dalam batubara muda dapat mengurangi nilai kalor karena abu tidak memberikan kontribusi energi selama pembakaran. Hasil pengukuran briket batubara muda dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 8. Analisa Briket Dari Batubara Muda

NO	PARAMETER	UNIT	HASIL	METODE
1	Kadar Air	%	3,0	Gravimetric
2	Kadar Abu	%	25,6	Gravimetric
3	Nilai Kalori	kcal/kg	4939,5	ASTM D240 (2009)
4	Kalium	mg/kg	1,4	NH Assetat IN PH7
5	Natrium	mg/kg	0,65	NH Assetat IN PH7
6	Litium	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
7	Magnesium	mg/kg	1,2	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
8	Silika	mg/kg	1,1	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
9	Aluminium	mg/kg	0,76	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
10	Raksa	mg/kg	0,005	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
11	Kadmium	mg/kg	1,6	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
12	Tembaga	mg/kg	1,3	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
13	Perak	mg/kg	1,82	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
14	Nikel	mg/kg	0,7	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
15	Timbal	mg/kg	1,8	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
16	Arsen	mg/kg	< 0,009	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
17	Kromium	mg/kg	1,02	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
18	Timah	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
19	Seng	mg/kg	1,3	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
20	Mangan	mg/kg	0,75	ASTM D6357-11 (ICP-OES)

Hasil pada Tabel 10 menunjukkan hasil analisis arang serat sawit dalam bentuk bubuk halus memiliki nilai kalori 2.815,6 kcal/kg, dengan kadar air 6,5% dan kadar abu 27,8%. Serat sawit terdiri dari berbagai jenis bagian tanaman seperti tandan kosong, serat *mesocarp*, dan serat lainnya. Pada setiap bagian tersebut memiliki karakteristik yang berbeda dan dapat mempengaruhi nilai kalori arang yang dihasilkan. Karakteristik umum dari arang serat sawit yaitu komposisi yang mencakup karbon, sedikit kadar air dan abu. Kadar abu umumnya lebih rendah sehingga menghasilkan nilai kalor yang lebih tinggi. Arang serat sawit berbentuk serat atau potongan kecil yang berwarna hitam atau kecoklatan dengan bentuk yang bergantung pada proses pembuatan dan pengolahan. Arang serat sawit memiliki nilai

kalori yang tinggi dan dapat digunakan dalam proses pengolahan panas atau pembangkit listrik.

Tabel 9. Analisa Arang Serat Sawit Dalam Bentuk Bubuk Halus

NO	PARAMETER	UNIT	HASIL	METODE
1	Kadar Air	%	6,5	Gravimetric
2	Kadar Abu	%	27,8	Gravimetric
3	Nilai Kalori	kcal/kg	2815,6	ASTM D240 (2009)
4	Kalium	mg/kg	1,1	NH Asetat IN PH7
5	Natrium	mg/kg	0,6	NH Asetat IN PH7
6	Litium	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
7	Magnesium	mg/kg	0,78	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
8	Silika	mg/kg	0,51	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
9	Aluminium	mg/kg	1,2	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
10	Raksa	mg/kg	0,003	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
11	Kadmium	mg/kg	0,55	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
12	Tembaga	mg/kg	1,4	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
13	Perak	mg/kg	0,87	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
14	Nikel	mg/kg	1,1	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
15	Timbal	mg/kg	1,4	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
16	Arsen	mg/kg	0,85	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
17	Kromium	mg/kg	1,06	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
18	Timah	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
19	Seng	mg/kg	1,6	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
20	Mangan	mg/kg	0,9	ASTM D6357-11 (ICP-OES)

Hasil yang ditunjukkan pada Tabel 11 menunjukkan analisis briket dari campuran RDF dan batubara muda memiliki nilai kalori 4.257,44 kcal/kg, dengan kadar air 4% dan kadar abu 24,2%. Semakin banyak komposisi organik yang terdapat dalam briket, maka nilai rata-rata kadar air, kadar abu, dan nilai kalor dalam briket RDF dan batubara muda semakin meningkat. Hasil tersebut sesuai penelitian Rania dkk, 2019 yaitu meningkatnya nilai kalor dipengaruhi karena semakin rendahnya kadar air serta kadar abu dalam briket tersebut. Briket RDF dan batubara muda memiliki nilai kalori yang tinggi karena kandungan karbon dan zat volatil yang tinggi, kadar air yang rendah, kepadatan tinggi, dan proses pembuatan yang efisien. Pengeringan, pemadatan, dan karbonisasi yang efektif adalah kunci untuk menghasilkan briket RDF dan batubara muda dengan nilai kalori yang tinggi, membuatnya menjadi sumber energi yang efisien.

Tabel 10. Analisa Briket Dari Campuran RDF Dan Batubara Muda

NO	PARAMETER	UNIT	HASIL	METODE
1	Kadar Air	%	4	Gravimetric
2	Kadar Abu	%	24,2	Gravimetric
3	Nilai Kalori	kcal/kg	4.257,44	ASTM D240 (2009)
4	Kalium	mg/kg	0,6	NH Asetat IN PH7
5	Natrium	mg/kg	0,58	NH Asetat IN PH7
6	Litium	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
7	Magnesium	mg/kg	1,55	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
8	Silika	mg/kg	0,59	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
9	Aluminium	mg/kg	0,60	ASTM D6357-11 (ICP-OES)

NO	PARAMETER	UNIT	HASIL	METODE
10	Raksa	mg/kg	0,003	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
11	Kadmium	mg/kg	0,55	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
12	Tembaga	mg/kg	1,8	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
13	Perak	mg/kg	1,04	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
14	Nikel	mg/kg	0,92	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
15	Timbal	mg/kg	1,09	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
16	Arsen	mg/kg	<0,009	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
17	Kromium	mg/kg	1,14	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
18	Timah	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
19	Seng	mg/kg	1,47	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
20	Mangan	mg/kg	0,67	ASTM D6357-11 (ICP-OES)

Pada hasil yang ditunjukkan Tabel 12, analisis briket dari campuran RDF dan arang dari serat sawit memiliki nilai kalor sebesar 2.159 kcal/kg, kadar air 7,3% dan kadar abu 29,6%. Kadar air yang tinggi dapat mempengaruhi nilai kalor, sehingga mengurangi efisiensi konversi dan kinerja karena sejumlah energi akan digunakan untuk menguapkan air tersebut. Kadar air adalah sifat yang sangat penting dan sangat mempengaruhi karakteristik pembakaran. Selama pembakaran kadar air dalam briket akan menyerap panas dan kalor untuk proses penguapan, sehingga akan mengurangi nilai kalor dari briket secara signifikan. Hal tersebut akan mengakibatkan terjadinya kehilangan kalor atau panas untuk mendorong reaksi pembakaran sehingga suhu pembakaran menjadi lebih rendah.

Mutu briket juga dipengaruhi jenis dan jumlah bahan perekat yang digunakan. Semakin tinggi komposisi perekat yang digunakan maka nilai kalor semakin rendah dan kadar air yang dihasilkan juga rendah. Kandungan selulosa juga mempengaruhi pembuatan briket, dimana semakin tinggi kandungan selulosa maka akan semakin baik kualitas briket. Penelitian yang dilakukan oleh Rahardja dkk, 2022 menunjukkan pembuatan briket dari serat sawit menunjukkan kadar air 7,6%; kadar abu 22,52%.

Tabel 11. Analisa Briket Dari Campuran RDF Dan Arang Dari Serat Sawit

NO	PARAMETER	UNIT	HASIL	METODE
1	Kadar Air	%	7,3	Gravimetric
2	Kadar Abu	%	29,6	Gravimetric
3	Nilai Kalori	kcal/kg	2.159	ASTM D240 (2009)
4	Kalium	mg/kg	0,81	NH Assetat IN PH7
5	Natrium	mg/kg	0,66	NH Assetat IN PH7
6	Litium	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
7	Magnesium	mg/kg	1,07	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
8	Silika	mg/kg	0,54	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
9	Aluminium	mg/kg	0,55	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
10	Raksa	mg/kg	0,003	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
11	Kadmium	mg/kg	1,4	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
12	Tembaga	mg/kg	1,2	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
13	Perak	mg/kg	0,59	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
14	Nikel	mg/kg	1,3	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
15	Timbal	mg/kg	1,4	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
16	Arsen	mg/kg	0,62	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
17	Kromium	mg/kg	1,8	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
18	Timah	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
19	Seng	mg/kg	1,8	ASTM D6357-11 (ICP-OES)

NO	PARAMETER	UNIT	HASIL	METODE
20	Mangan	mg/kg	0,89	ASTM D6357-11 (ICP-OES)

Berdasarkan Tabel 13 menunjukkan hasil analisa briket dari campuran batubara muda dan arang dari serat sawit memiliki nilai kalori 4.155,6 kcal/kg, dengan kadar air 3,6% dan kadar abu 26,4%. Nilai kalor ini sesuai penelitian Partiwi dan Prabowo (2021) yang menunjukkan nilai kalor sebesar 5.617,25 Kcal/kg, dengan kadar abu 23,56% dan kadar air sebanyak 5,49%. Semakin banyak komposisi organik yang terdapat dalam briket, maka nilai rata – rata kadar air, kadar abu, dan nilai kalor yang terkandung dalam briket sampah semakin meningkat. Bahan yang digunakan untuk pembuatan briket sebaiknya yang memiliki nilai kadar air rendah untuk mencapai nilai kalor yang tinggi. Semakin rendah nilai kadar air dan kadar abu briket, maka akan meningkatkan nilai kalor briket. Nilai kalor briket juga dipengaruhi nilai karbon yang terikat dalam briket. Semakin tinggi nilai karbon briket, maka akan semakin tinggi nilai kalor briket. Briket batubara terkarbonisasi jika dibandingkan dengan sampel briket batubara terkarbonisasi asal batubara muda, memiliki kadar air yang lebih rendah, sulfur yang lebih rendah dan nilai kalor yang lebih tinggi (Idris et.al, 2021).

Tabel 12. Analisa Briket Dari Campuran Batubara Muda Dan Arang Serat Sawit

NO	PARAMETER	UNIT	HASIL	METODE
1	Kadar Air	%	3,6	Gravimetric
2	Kadar Abu	%	26,4	Gravimetric
3	Nilai Kalori	kcal/kg	4155,6	ASTM D240 (2009)
4	Kalium	mg/kg	0,65	NH Assetat IN PH7
5	Natrium	mg/kg	0,52	NH Assetat IN PH7
6	Litium	mg/kg	0,0011	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
7	Magnesium	mg/kg	0,82	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
8	Silika	mg/kg	0,56	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
9	Aluminium	mg/kg	0,60	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
10	Raksa	mg/kg	0,004	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
11	Kadmium	mg/kg	0,19	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
12	Tembaga	mg/kg	1,45	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
13	Perak	mg/kg	0,64	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
14	Nikel	mg/kg	1,42	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
15	Timbal	mg/kg	0,80	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
16	Arsen	mg/kg	<0,009	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
17	Kromium	mg/kg	0,51	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
18	Timah	mg/kg	0,001	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
19	Seng	mg/kg	0,12	ASTM D6357-11 (ICP-OES)
20	Mangan	mg/kg	0,14	ASTM D6357-11 (ICP-OES)

Data hasil analisa telah disajikan dalam delapan tabel yang menunjukkan parameter-parameter penting seperti kadar air, kadar abu, nilai kalori, dan kandungan logam berat.

A. Nilai Kalor

Nilai kalori merupakan parameter penting yang menunjukkan jumlah energi yang dapat dihasilkan oleh bahan bakar saat dibakar. Berdasarkan data yang diberikan:

- Briket dari arang sampah RDF memiliki nilai kalori 2.566.2 kcal/kg.
- Briket dari batubara muda memiliki nilai kalori tertinggi sebesar 4.939.5 kcal/kg.
- Briket dari arang serat sawit memiliki nilai kalori 2.815.6 kcal/kg.
- Briket campuran RDF dan batubara muda serta briket campuran batubara muda dan arang serat sawit memiliki nilai kalori masing-masing 4.257.44 kcal/kg dan 4.155.6 kcal/kg.

Bila dibandingkan dengan SNI yang menetapkan nilai kalor minimum untuk briket biomassa sebesar 4.000 kcal/kg (BSN, 2016), maka briket batubara muda, briket campuran RDF dan batubara muda, dan briket campuran batubara muda dan arang serat sawit memenuhi standar. Sedangkan bila dibandingkan dengan ASTM yang menetapkan nilai kalor minimum sebesar 4500 kcal/kg (ASTM, 2018), maka hanya briket dari batubara muda yang memenuhi standar. Namun semua briket yang dihasilkan pada penelitian ini, nilai kalori nya masih di bawah nilai kalori briket tempurung kelapa memiliki nilai kalor yang lebih tinggi sekitar 5.000-6.000 kkal/kg, sesuai dengan penelitian oleh Ifa *et al.* (2020) yang menemukan bahwa tempurung kelapa merupakan bahan baku briket yang sangat efisien, Ali, A., Kumari, M., Manisha et al. (2024), Yunusa, S.U., Mensah, E., Preko, K. et al (2023).

B. Kadar Air dan Kadar Abu

Kadar air dan kadar abu adalah parameter yang penting dalam menentukan efisiensi dan kualitas briket. Kadar air yang rendah menunjukkan bahan bakar yang lebih efisien, sedangkan kadar abu yang rendah menunjukkan bahan bakar yang lebih bersih.

- Briket dari batubara muda memiliki kadar air terendah sebesar 3% dan kadar abu sebesar 25.6%.
- Briket campuran RDF dan batubara muda memiliki kadar air sebesar 4% dan kadar abu 24.2%.
- Briket dari arang serat sawit memiliki kadar air 6.5% dan kadar abu 27.8%.

Bila dibandingkan dengan SNI yang menetapkan kadar air maksimum untuk briket adalah 15% dan kadar abu maksimum 8% (BSN, 2016). Semua briket memenuhi standar kadar air, tetapi tidak ada yang memenuhi standar kadar abu. Sedangkan bila dibandingkan dengan ASTM yang menetapkan kadar air maksimum 10% dan kadar abu maksimum 6% (ASTM, 2018), maka semua briket memenuhi standar kadar air, tetapi tidak ada yang memenuhi standar kadar abu. Nilai kadar abu dari briket yang dihasilkan pada penelitian ini masih di atas nilai kadar abu pada briket tempurung kelapa sekitar 2-3%, sedangkan pada briket sekam padi bisa mencapai 10-15%. Briket dari tempurung kelapa dan kayu cenderung memiliki kadar abu yang lebih rendah dibandingkan sekam padi. Hal ini dikarenakan tempurung kelapa memiliki komposisi mineral yang lebih rendah Obi, et.all (2022).

C. Kandungan Logam Berat

Kandungan logam berat pada briket perlu diperhatikan karena dapat berdampak negatif pada kesehatan manusia dan lingkungan. Beberapa logam berat yang dianalisa antara lain Hg, Cd, Pb, As, dan Cr.

- Briket dari arang sampah RDF (L.2) memiliki kandungan Hg sebesar 0.005 mg/kg, Cd 1.1 mg/kg, dan Pb 0.74 mg/kg.
- Briket dari batubara muda (L.4) memiliki kandungan Hg sebesar 0.005 mg/kg, Cd 1.6 mg/kg, dan Pb 1.8 mg/kg.
- Briket campuran batubara muda dan arang serat sawit (L.8) memiliki kandungan Hg sebesar 0.004 mg/kg, Cd 0.19 mg/kg, dan Pb 0.80 mg/kg.

Tidak ada standar khusus untuk kandungan logam berat dalam SNI untuk briket biomassa, tetapi secara umum, kandungan logam berat yang rendah diinginkan untuk menjaga kualitas lingkungan. Sedangkan ASTM tidak secara eksplisit menetapkan batasan untuk kandungan logam berat dalam briket biomassa, tetapi konsentrasi logam berat yang rendah adalah indikator kualitas yang baik dan lebih aman untuk penggunaan.

Secara umum, briket dari batubara muda menunjukkan performa terbaik dalam hal nilai kalori, kadar air, dan kadar abu, namun memiliki kandungan logam berat yang lebih tinggi dibandingkan briket dari bahan baku lainnya. Briket campuran RDF dan batubara muda serta campuran batubara muda dan arang serat sawit menunjukkan keseimbangan yang baik antara nilai kalori yang tinggi dan kadar air serta abu yang relatif rendah. Studi oleh Sulaiman et al. (2020) menemukan bahwa briket dari biomassa memiliki nilai kalori yang lebih rendah dibandingkan batubara, namun memiliki emisi gas rumah kaca yang lebih rendah dan lebih ramah lingkungan. Studi lain oleh Zhang et al. (2018) menunjukkan bahwa campuran batubara dan biomassa dapat meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi partikulat.

RDF merupakan solusi ganda permasalahan pengolahan limbah dan alternatif dekarbonisasi sumber energi untuk pembangkit listrik dan industri, memanfaatkan limbah domestik yang dapat dibakar menjadi sumber panas atau yang kemudian dikonversikan menjadi listrik. RDF menjadi salah satu bahan bakar ramah lingkungan yang dapat membantu sebagai solusi permasalahan sampah di perkotaan (Gunadi dkk, 2023). Komposisi dan kualitas dari RDF dapat sangat bervariasi, meskipun pada umumnya RDF memiliki nilai kalori yang lebih tinggi dan kandungan klorin yang lebih rendah dibandingkan sampah tercampur. Beberapa negara di Eropa telah menjadikan RDF sebagai komoditas, namun karena persyaratan kualitas RDF tidak diatur secara spesifik oleh masing – masing negara, otoritas setempat kemudian menerapkan persyaratan tambahan dalam izin lingkungan pemanfaatan RDF. Standarisasi RDF pada dasarnya adalah pengaturan spesifikasi parameter utama RDF sehingga kualitas produk RDF dapat dibandingkan dan dikendalikan. Standar RDF penting untuk diterapkan karena RDF berasal dari limbah atau sampah yang komposisinya heterogen dan dengan demikian rentan terhadap fluktuasi komposisi. Penggunaan RDF sebagai bahan bakar menghasilkan keuntungan diantaranya yaitu homogenitas komposisi fisik-kimia, nilai kalor yang tinggi, kemudahan disimpan,

semakin sedikit emisi polutan yang dihasilkan dan berkurangnya udara yang dibutuhkan dalam proses pembakaran (Caputo et.al, 2002).

Nilai perbandingan kandungan RDF dari hasil penelitian dengan baku mutu SNI 8966 tahun 2021, menunjukkan bahwa arang RDF dalam bentuk bubuk halus memenuhi baku mutu kelas 3 SNI 8966 dengan nilai kandungan air yaitu 8,6%, kandungan abu 28,4%, dan nilai kalori sebesar 1.876,5 Kcal/kg. Komposisi kandungan air dan abu sangat mempengaruhi nilai kalori yang dihasilkan karena mempengaruhi proses pembakaran. Komposisi RDF perlu dikombinasikan dengan biomassa lainnya maupun sampah *compustible* sehingga memenuhi performa persyaratan sebagai sumber energi pembangkit listrik. Substitusi batubara dengan RDF memiliki dampak positif yaitu terhadap penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) di Industri, dengan faktor emisi CO₂ di RDF yang lebih rendah dibandingkan batubara akibat kandungan biogenik di dalam RDF (Phyu et.al, 2024). Tantangan dalam pemanfaatan RDF di Indonesia antara lain yaitu kualitas RDF yang rendah karena berasal dari sampah rumah tangga yang tercampur dengan kadar air yang tinggi serta memiliki kandungan klor dan logam. Selain itu, tantangan lainnya yaitu pada faktor keuangan seperti biaya investasi untuk pembangunan fasilitas RDF. Industri yang berpotensi dalam pemanfaatan RDF sebagai penghasil panas adalah industri yang menggunakan tungku pembakaran seperti industri semen, juga industri yang menggunakan boiler seperti industri pupuk, kelapa sawit, kertas dan pulp, serta makanan dan minuman. Pemetaan industri pemanfaat RDF potensial perlu melihat detail identifikasi karakteristik RDF dan instalasi fasilitas tambahan yang diperlukan oleh industri tersebut untuk memperkirakan keberlanjutan implementasi RDF sebagai bahan bakar alternatif dan sebagai sumber energi terbarukan.

Berdasarkan hasil penelitian kualitas briket yang telah dilakukan, apabila dibandingkan dengan nilai SNI Briket menunjukkan bahwa untuk briket RDF menunjukkan nilai yang belum memenuhi persyaratan SNI di Indonesia karena kandungan abu yang masih melebihi kadar maksimum (8%). Namun, untuk briket RDF memenuhi SNI 8966 tahun 2021 kelas 3. Briket arang sampah RDF memerlukan evaluasi lebih lanjut terutama kesesuaian kandungan abu sehingga dapat menghasilkan nilai kalor yang lebih tinggi dan dapat memenuhi SNI Indonesia. Komposisi sampah organik dan sampah plastik dalam briket berpengaruh terhadap karakteristik briket RDF. Semakin banyak komposisi sampah plastik dalam briket RDF, maka RDF cenderung memiliki kadar abu yang lebih tinggi. Hal tersebut karena plastik merupakan bahan yang sulit terurai sehingga untuk pembakaran dengan komposisi plastik yang lebih banyak akan menghasilkan abu yang semakin banyak (Tihin et.al, 2023). Upaya yang dapat dilakukan dalam menurunkan kadar abu dalam briket antara lain yaitu dengan pemilihan bahan baku yang lebih bersih, optimalisasi produksi dan pemanfaatan aditif yang lebih efektif. Briket dapat menghasilkan kadar abu yang lebih tinggi karena beberapa faktor, termasuk bahan baku yang digunakan, proses pembuatan dan bahan aditif yang ditambahkan. Beberapa penyebab kandungan abu yang tinggi dalam briket yaitu:

- a. Bahan baku, briket seringkali dibuat dari bahan baku yang mengandung lebih banyak mineral dan zat anorganik, seperti serbuk gergaji, batok kelapa, arang,

atau limbah pertanian. Bahan – bahan ini secara alami memiliki kandungan abu yang lebih tinggi dibandingkan bahan bakar fosil seperti batu bara.

- b. Proses pembuatan, selama proses pembuatan briket, suhu dan tekanan yang digunakan bisa menyebabkan beberapa bahan terurai dan menghasilkan abu. Misalnya bahan organik yang terbakar atau terdekomposisi pada suhu tinggi akan menghasilkan residu abu.
- c. Aditif, seringkali bahan tambahan ditambahkan dalam campuran briket untuk memperbaiki kekuatan dan kestabilan produk akhir. Aditif ini juga dapat menyumbang pada peningkatan kadar abu jika mengandung senyawa anorganik
- d. Efisiensi pembakara, briket umumnya memiliki efisiensi pembakaran yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil seperti batu bara, yang berarti lebih banyak residu yang tidak terbakar dan menjadi abu.

Keberhasilan pemanfaatan RDF sebagai bahan bakar alternatif tergantung pada kombinasi kriteria diantaranya yaitu faktor ekonomi, peraturan tentang limbah dan industry serta Kerjasama yang baik antar berbagai sektor industri dan instansi terkait. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pemanfaatan RDF di industri sebagai berikut:

- a. Sistem pembakaran di *Kiln/Furnance*, kondisi saat operasi yaitu suhu operasi dan waktu retensi sangat penting untuk menghindari pembentukan dioksin dan furan.
- b. Alat pengendali emisi, dimana emisi yang dilepaskan dari pembakaran RDF dalam kondisi terkendali dan tidak terkendali akan berbeda
- c. Kapasitas dan faktor keselamatan sumber daya manusia, Industri yang menggunakan RDF perlu memiliki kapasitas internal dalam mengukur dan memantau tingkat polutan konvensional. Dalam hal ini, risiko kesehatan dan lingkungan dari abu yang dihasilkan pembangkit listrik berbahan bakar RDF perlu menjadi perhatian dan perlu dikelola lebih lanjut sesuai peraturan
- d. Pasar RDF, untuk mendorong pasar RDF, kenaikan harga energi merupakan pendorong utama, penunjang lainnya yaitu fasilitas pengolahan sampah menjadi RDF, kemitraan jangka panjang dengan konsumen pengguna energi panas, serta mitigasi resiko terkait pasokan RDF.

Hasil analisis batubara muda dalam bentuk bubuk halus apabila dibandingkan dengan SNI menunjukkan bahwa kadar air dengan hasil 3,1% memenuhi SNI yaitu maksimum 15%, dengan hasil nilai kalori yaitu sebesar 4.689,5 Kcal/kg dengan SNI minimal 4.000 Kcal/kg. Akan tetapi, untuk kadar abu menunjukkan hasil yang belum memenuhi standar SNI yaitu dengan nilai 24,6% dengan SNI maksimum kadar abu yang diizinkan yaitu 8%. Kandungan abu dalam batubara muda umumnya tinggi karena deposisi organik yang belum mengalami proses kompaksi yang cukup untuk memisahkan mineral – mineral dari material organik utama (karbon). Hal tersebut dapat menyebabkan konversi mineral non-karbon dalam batubara muda, yang kemudian berkontribusi pada kandungan abu yang tinggi setelah pembakaran. Faktor lain yang menyebabkan kandungan abu yang tinggi dalam batubara muda

yaitu proses geologis yang lebih baru belum memberikan waktu yang cukup untuk pemisahan mineral – mineral non karbon dari karbon dalam batubara. Sehingga, batubara muda cenderung memiliki kandungan abu yang tinggi karena mineral – mineral masih terikat erat dengan bahan bakar batubara. Terdapat beberapa upaya yang dapat dilakukan dalam menurunkan kadar abu pada pembakaran batubara muda yaitu:

- a. Pencucian batubara, proses ini melibatkan pencucian batubara untuk menghilangkan kotoran dan bahan non-batubara, termasuk abu. Proses pencucian ini biasanya dilakukan dengan menggunakan air dan bahan kimia tertentu.
- b. Penggunaan aditif, beberapa bahan kimia dapat ditambahkan selama pembakaran untuk membantu mengurangi pembentukan abu.
- c. Pengolahan sebelum pembakaran, dalam proses ini melibatkan proses seperti pengeringan dan pemanasan awal batubara sebelum dibakar. Pengeringan dapat mengurangi kadar air dan mengurangi produksi abu.
- d. Penggunaan alat penyaring, alat ini digunakan untuk menangkap partikel abu yang terbawa oleh gas buang selama pembakaran.
- e. Optimasi proses pembakaran, mengatur kondisi operasi seperti temperatur dan aliran udara dapat membantu mengurangi pembentukan abu selama proses pembakaran.

Berdasarkan hasil perbandingan Analisa Arang Serat Sawit dengan SNI 8966 tahun 2021 menunjukkan bahwa nilai kandungan air dan abu dari arang serat sawit memenuhi SNI kelas 3. Arang serat sawit adalah produk yang dihasilkan dari limbah tanda kosong kelapa sawit yang merupakan serat sisa dari proses buah kelapa sawit. Arang serat sawit dapat dijadikan bahan bakar alternatif dalam berbagai aplikasi industri karena efisiensi energi yang tinggi dan sifat ramah lingkungan. Nilai kalori arang serat sawit dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain kadar air, kandungan karbon, kandungan abu, ukuran partikel, kandungan lignin dan komponen organik lainnya dan kualitas bahan baku awal. Penggunaan arang serat sawit sebagai bahan bakar alternatif perlu mempertimbangkan faktor terutama terkait kualitas bahan baku dan proses produksi terutama pada proses pembakaran.

Menurut Widyatmoko et.al (2018), menyatakan bahwa briket yang berkualitas baik memiliki permukaan halus dan memenuhi kriteria diantaranya yaitu mudah dinyalakan, emisi gas yang dihasilkan tidak beracun, tahan air dan tidak berjamur jika disimpan dalam jangka waktu yang lama, serta memiliki kekuatan pembakaran yang baik. Briket dari batubara muda memiliki potensi energi yang dapat dimaksimalkan dengan mempertimbangkan berbagai faktor diantaranya yaitu proses produksi, penggunaan dan pemeliharaan. Penggunaan briket dari batubara muda menjadi salah satu alternatif bahan bakar terutama di daerah yang terdapat batubara muda. Apabila melihat perbandingan SNI briket dengan hasil penelitian briket yang terbuat dari batubara muda menunjukkan bahwa kandungan air 3% yang memenuhi SNI, kandungan abu yaitu 25,6% belum memenuhi SNI dan nilai kalori yang dihasilkan

yaitu 4.939,5 Kcal/kg yang memenuhi SNI. Pada umumnya kandungan abu yang tinggi dalam briket batubara muda disebabkan oleh karakteristik alami batubara muda yang belum matang secara geologis dan proses pembuatan briket yang menggunakan bahan tambahan untuk membentuk bahan bakar padat. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kandungan abu yang tinggi dalam briket batubara yaitu:

- a. Kandungan Mineral Alami, batubara muda umumnya belum mengalami proses diagenesis atau metamorfosis yang cukup lama. Mineral non-karbon seperti silika, alumina, kalsium oksida dan lainnya masih terkandung dalam jumlah signifikan dalam batubara muda. Saat batubara muda dibakar untuk membuat briket, mineral-mineral ini tidak terbakar dan meninggalkan abu setelah proses pembakaran.
- b. Proses pembuatan, dalam proses pembuatan melibatkan pemadatan serbuk batubara muda dengan menggunakan perekat atau bahan tambahan lainnya. Beberapa bahan tambahan tersebut dapat meningkatkan kandungan abu dalam briket setelah proses pembakaran.
- c. Komposisi kimia, dalam batubara muda, komposisi kimia dari mineral tertentu mempengaruhi kandungan abu dalam pembuatan briket batubara muda.

Kadar air mempengaruhi kualitas briket yang dihasilkan, semakin rendah kadar air, akan menyebabkan penurunan terhadap nilai kalornya. Nilai kalor menjadi parameter mutu paling penting bagi briket sebagai bahan bakar karena menentukan kualitas briket. Semakin tinggi nilai kalor bahan bakar briket, maka semakin baik pula kualitasnya. Penggunaan briket campuran dari sampah RDF dan batubara muda seringkali menjadi alternatif bahan bakar yang ramah lingkungan. Hasil penelitian briket campuran sampah RDF dengan batubara muda apabila dibandingkan dengan SNI menunjukkan bahwa nilai kalori memenuhi SNI yaitu sebesar 4.257,44 Kcal/kg (memenuhi SNI minimal 4.000 Kcal/kg), dengan kandungan air yaitu 4% (SNI maksimum 15%). Namun, untuk kadar abu belum memenuhi SNI yaitu dengan hasil 24,2% (SNI kadar abu maksimum 8%). Kadar abu yang tinggi dapat mempengaruhi efisiensi dan proses pembakaran. Upaya yang dapat dilakukan dalam mengurangi abu dalam briket campuran sampah RDF dan batubara muda yaitu memilih proses pengolahan RDF yang lebih efektif untuk mengurangi kandungan abu, memilih bahan tambahan atau perekat yang lebih bersih atau memiliki kandungan abu yang lebih rendah, serta mengoptimalkan suhu dan kondisi pembakaran untuk mengurangi pembentukan abu selama proses pembakaran briket. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi tingginya kandungan abu pada briket campuran sampah RDF dan batubara muda yaitu:

- a. Komposisi RDF, dalam komposisi RDF yang terbuat dari campuran berbagai macam limbah padat tidak selalu efektif dalam menghilangkan semua mineral atau abu.
- b. Proses pembuatan briket, adanya bahan tambahan seperti perekat dapat meningkatkan kandungan abu dalam briket yang terbentuk.

- c. Kandungan mineral dalam batubara muda, Ketika batubara muda dibakar atau diproses menjadi briket, maka mineral – mineral yang terkandung didalamnya akan meninggalkan abu.
- d. Suhu dan Teknik pembakaran. Proses pembakaran briket RDF dan batubara muda dapat mempengaruhi jumlah abu yang dihasilkan.
- e. Pengolahan RDF, penggunaan teknologi yang lebih canggih dapat membantu mengurangi kandungan abu dalam RDF

Beberapa aspek yang mempengaruhi bagi karakteristik briket arang yaitu kehalusan serbuk, temperature karbonisasi, tekanan serta komposisi perpaduan briket juga dapat mempengaruhi karakter briket (Arni dkk, 2014). Berdasarkan hasil penelitian Analisa briket yang dibuat dari campuran sampah RDF dan arang serat sawit apabila dibandingkan dengan SNI menunjukkan hasil yaitu belum memenuhi persyaratan SNI di Indonesia karena kandungan abu yang masih melebihi kadar maksimum (8%). Namun, untuk briket campuran arang sampah RDF dan arang serat sawit memenuhi SNI 8966 tahun 2021 kelas 3. Sedangkan, hasil analisa briket campuran batubara muda dan arang serat sawit apabila dibandingkan dengan SNI menunjukkan hasil dengan nilai kalori yang memenuhi SNI yaitu sebesar 4.155,6 Kcal/kg, dengan kandungan air yaitu 3,6%. Akan tetapi, kadar abu dari briket tersebut menunjukkan hasil yang belum memenuhi SNI yaitu sebesar 26,4%. Beberapa faktor mempengaruhi kadar abu dari briket campuran batubara muda dan arang serat sawit, diantaranya yaitu karakteristik alami batubara muda yang belum matang secara geologis dan kualitas arang serat sawit. Namun, apabila melihat analisis perbandingan antara briket campuran sampah RDF dan arang serat sawit menunjukkan nilai kalori yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai kalori dari briket campuran batubara muda dan arang serat sawit. Hal tersebut disebabkan karena kandungan karbon briket batubara muda yang lebih tinggi sehingga menghasilkan nilai kalor yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan RDF.

Jika dibandingkan antara RDF dalam bentuk *fluffy* dengan briket, maka nilai kalor berturut turut tertinggi sampai terendah adalah; briket dari batubara muda; 4.939,5 kcal/kg; briket campuran RDF dan batubara muda; 4.257,4 kcal/kg; briket campuran batubara muda dan arang serat sawit; 4.155,6 kcal/kg; RDF dalam bentuk *fluffy*; 4.068,3 kcal/kg; briket dari arang serat sawit; 2.815,6 kcal/kg; dan briket dari RDF; 2.566,2 kcal/kg. Sedangkan berdasarkan kadar air yang terendah adalah briket dari batubara muda sebesar 3%. Untuk briket campuran RDF dan batubara muda kadar air meningkat menjadi 4% dan briket dari arang serat sawit memiliki kadar air 6,5%. Kadar air tertinggi terdapat pada RDF dalam bentuk *fluffy* yaitu 30,17 %.

Ditinjau dari segi kualitas, briket dari batubara muda merupakan pilihan terbaik, namun minat *offtaker* khususnya industri semen terhadap RDF *fluffy* cukup tinggi karena ketersediaan, akses, harga, dan memiliki sifat pembakaran yang lebih cepat karena kerapatannya rendah, sehingga terdapat lebih banyak oksigen. Menurut CPHEEO, (2018) RDF memiliki potensi untuk dimanfaatkan dengan *co- firing* atau *thermal conversion* dalam industri

- a. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU); karena sifatnya yang memiliki kadar air tinggi, maka penggunaan RDF dalam bentuk *fluffy* tidak dapat digunakan, namun penggunaan dalam bentuk briket RDF dicampur dengan batubara muda, masih dapat diterima, karena pada dasarnya terdapat upaya pengurangan batubara yang berarti pengurangan biaya produksi. Penelitian yang dilakukan Widyatmoko (2018), membuktikan bahwa nilai kalor yang dihasilkan briket batubara dan RDF dapat mencapai 9.867,1 kcal/kg. Konsep ini telah diterapkan di India sejak Tahun 2015, dimana 10% PLTU di India menggunakan briket campuran RDF dan batubara muda.
- b. Industri bata; penggunaan RDF berpotensi menimbulkan emisi berbahaya seperti *dioksin furan* dan klorida, karena suhu pembakaran antara 700° - 1.100°C (pembakaran tidak sempurna), sehingga untuk menurunkan *dioksin furan* dan klorida dapat dilakukan pencucian dengan resiko adanya peningkatan kadar air yang akan memperlama waktu pengeringan (Damanhuri & Padmi, 2019).
- c. Industri pupuk; penggunaan RDF khususnya dalam bentuk *fluffy* memiliki tantangan terhadap kestabilan kalor pembakaran dan meninggalkan debu leleh serta korosi pada boiler, karena titik bakar yang rendah. Untuk itu diperlukan percampuran RDF dengan batubara.
- d. Industri dengan teknologi *pyrolysis*; dimana RDF dapat digunakan sebagai bahan baku yang diproses dengan pembakaran tinggi dengan oksigen terbatas yang menghasilkan produk minyak, gas dan char (Goodman & Texeira, 1990).
- e. Industri dengan teknologi *biochemical conversion* dengan proses lanjutan *anaerobic digestion* dan *hydrolysis fermentation*, yang mengubah RDF menjadi atau menghasilkan metana dan etanol (Goodman & Texeira, 1990).
- f. Sedangkan untuk industri logam, bahan bakar dari RDF tidak dapat digunakan karena sifatnya yang autogenous, sehingga menurunkan mutu produk logam (CPHEEO, 2018).

Berdasarkan hasil analisis di atas, potensi kesediaan RDF (penawaran) relatif besar karena bahan baku baik dari sampah MSW dan sampah *landfill*, namun tantangan terbesar terletak pada permintaan RDF yang saat ini baru terbatas pada industri semen. Permintaan potensial juga terjadi pada PLTU, namun RDF harus dicampur dengan batubara, sebagai bagian dari upaya pengurangan konsumsi bahan bakar fosil. Upaya - upaya untuk meningkatkan permintaan RDF dapat dilakukan dengan;

- a. Melakukan edukasi pasar untuk penggunaan energi terbarukan, hal ini didorong adanya kenaikan harga energi bahan bakar fosil.
- b. Menyesuaikan harga pasar, dengan menerapkan harga standar untuk energi terbarukan.
- c. Adanya regulasi tentang kewajiban penggunaan RDF untuk energi untuk kegiatan tertentu dan atau keseluruhan, sehingga mendorong kemitraan jangka panjang dengan dengan berbagai jenis industri.
- d. Menerapkan sistem pembakaran stabil yang dapat memanfaatkan RDF sebagai energi dan mengurangi emisi yang ditimbulkan.

- e. Menerapkan teknologi proses RDF untuk produk lainnya seperti minyak, biogas, dan char.

2.3.5. Hasil Pengukuran TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) dan Kandungan Pestisida

Berikut merupakan hasil pengukuran TCLP dan kandungan pestisida pada bahan baku RDF yang bersumber dari sampah baru dan sampah lama (*landfill*):

Tabel 13 Hasil Pengukuran parameter TCLP dan Pestisida pada Sampah baru

No.	Parameter	Unit	Hasil L.1	Metode
1.	Benzene	mg/L	0,02	USEPA METHOD 8260D
2.	Tetrachloride Carbon	mg/L	< 0,011	USEPA METHOD 8260D
3.	Chlorobenzene	mg/L	0,1	USEPA METHOD 8260D
4.	Chloroform	mg/L	< 0,015	USEPA METHOD 8260D
5.	1,2 Dichlorobenzene	mg/L	1	USEPA METHOD 8260D
6.	1,4 Dichlorobenzene	mg/L	1	USEPA METHOD 8260D
7.	1,2 Dichloroethane	mg/L	< 0,023	USEPA METHOD 8260D
8.	1,1 Dichloroethene	mg/L	< 0,007	USEPA METHOD 8260D
9.	Ethylbenzene	mg/L	0,1	USEPA METHOD 8260D
10.	Hexachlorobutadiene	mg/L	< 0,003	USEPA METHOD 8260D
11.	Nitrobenzene	mg/L	0,1	USEPA METHOD 8260D
12.	Styrene	mg/L	0,03	USEPA METHOD 8260D
13.	1,1,1,2 Tetrachloroethane	mg/L	< 0,010	USEPA METHOD 8260D
14.	1,1,2,2 Tetrachloroethane	mg/L	< 0,013	USEPA METHOD 8260D
15.	Toluene	mg/L	0,1	USEPA METHOD 8260D
16.	1,1,1 Trichloroethane	mg/L	< 0,021	USEPA METHOD 8260D
17.	1,1,2 Trichloroethane	mg/L	< 0,014	USEPA METHOD 8260D
18.	Trichloroethene	mg/L	< 0,011	USEPA METHOD 8260D
19.	Xylene Total (p+m+o)	mg/L	0,1	USEPA METHOD 8260D
20.	Aldrin	mg/L	0,004	USEPA METHOD 8270E
21.	Dieldrin	mg/L	0,1	USEPA METHOD 8270E
22.	DDT	mg/L	< 0,001	USEPA METHOD 8270E
23.	DDD	mg/L	< 0,001	USEPA METHOD 8270E
24.	DDE	mg/L	< 0,001	USEPA METHOD 8270E
25.	Chlordane (cis-Chlordane)	mg/L	< 0,001	USEPA METHOD 8270E
26.	Chlordane (trans-Chlordane)	mg/L	< 0,001	USEPA METHOD 8270E
27.	Heptachlor	mg/L	0,01	USEPA METHOD 8270E
28.	Lindane **	mg/L	0,02	USEPA METHOD 8270E
29.	Methoxy-chlor	mg/L	< 0,013	USEPA METHOD 8270E
30.	Endrin	mg/L	0,01	USEPA METHOD 8270E
31.	Hexachlorobenzene	mg/L	< 0,003	USEPA METHOD 8270E

Keterangan; L.1 = Bahan Baku Sampah Baru

Berdasarkan hasil pengukuran terhadap bahan baku sampah baru RDF yang disajikan pada Tabel di atas, diketahui bahwa secara umum konsentrasi parameter-parameter yang diamati tergolong relatif rendah. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan unsur berbahaya dalam bahan baku RDF masih dalam batas yang dapat ditoleransi. Apabila hasil ini dikaitkan dengan aspek kelayakan pemanfaatan sampah

sebagai bahan baku RDF, maka dapat disimpulkan bahwa sampah baru RDF dari lokasi Bantargebang masih memenuhi kriteria dan layak untuk dijadikan sebagai bahan bakar alternatif dalam proses produksi energi.

Tabel 14 Hasil Pengukuran Parameter TCLP dan Pestisida pada Sampah Lama

No.	Parameter	Unit	Hasil	Metode
			L.2	
1.	Benzene	mg/L	0,01	USEPA METHOD 8260D
2.	Tetrachloride Carbon	mg/L	< 0,011	USEPA METHOD 8260D
3.	Chlorobenzene	mg/L	0,1	USEPA METHOD 8260D
4.	Chloroform	mg/L	< 0,015	USEPA METHOD 8260D
5.	1,2 Dichlorobenzene	mg/L	1	USEPA METHOD 8260D
6.	1,4 Dichlorobenzene	mg/L	1	USEPA METHOD 8260D
7.	1,2 Dichloroethane	mg/L	< 0,023	USEPA METHOD 8260D
8.	1,1 Dichloroethene	mg/L	< 0,007	USEPA METHOD 8260D
9.	Ethylbenzene	mg/L	0,2	USEPA METHOD 8260D
10.	Hexachlorobutadiene	mg/L	< 0,003	USEPA METHOD 8260D
11.	Nitrobenzene	mg/L	0,1	USEPA METHOD 8260D
12.	Styrene	mg/L	0,03	USEPA METHOD 8260D
13.	1,1,1,2 Tetrachloroethane	mg/L	< 0,010	USEPA METHOD 8260D
14.	1,1,2,2 Tetrachloroethane	mg/L	< 0,013	USEPA METHOD 8260D
15.	Toluene	mg/L	0,1	USEPA METHOD 8260D
16.	1,1,1 Trichloroethane	mg/L	< 0,021	USEPA METHOD 8260D
17.	1,1,2 Trichloroethane	mg/L	< 0,014	USEPA METHOD 8260D
18.	Trichloroethene	mg/L	< 0,011	USEPA METHOD 8260D
19.	Xylene Total (p+m+o)	mg/L	0,1	USEPA METHOD 8260D
20.	Aldrin	mg/L	0,003	USEPA METHOD 8270E
21.	Dieldrin	mg/L	0,1	USEPA METHOD 8270E
22.	DDT	mg/L	< 0,001	USEPA METHOD 8270E
23.	DDD	mg/L	< 0,001	USEPA METHOD 8270E
24.	DDE	mg/L	< 0,001	USEPA METHOD 8270E
25.	Chlordane (cis-Chlordane)	mg/L	< 0,001	USEPA METHOD 8270E
26.	Chlordane (trans-Chlordane)	mg/L	< 0,001	USEPA METHOD 8270E
27.	Heptachlor	mg/L	0,01	USEPA METHOD 8270E
28.	Lindane **	mg/L	0,01	USEPA METHOD 8270E
29.	Methoxy-chlor	mg/L	< 0,013	USEPA METHOD 8270E
30.	Endrin	mg/L	0,01	USEPA METHOD 8270E
31.	Hexachlorobenzene	mg/L	< 0,003	USEPA METHOD 8270E

Keterangan; L.2 = Bahan Baku Sampah Lama (Landfill)

Berdasarkan hasil pengukuran terhadap bahan baku sampah lama (*landfill*) RDF yang disajikan pada Tabel di atas, diketahui bahwa secara umum konsentrasi parameter-parameter yang diamati tergolong relatif rendah. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan unsur berbahaya dalam bahan baku RDF masih dalam batas yang dapat ditoleransi. Apabila hasil ini dikaitkan dengan aspek kelayakan pemanfaatan sampah sebagai bahan baku RDF, maka dapat disimpulkan bahwa sampah baru RDF dari lokasi Bantargebang masih memenuhi kriteria dan layak untuk dijadikan sebagai bahan bakar alternatif dalam proses produksi energi.

2.4. Kesimpulan dan Saran

2.4.1. Kesimpulan

RDF yang dihasilkan dari pengolahan sampah di TPST Bantargebang memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Berdasarkan hasil analisis terhadap berbagai bentuk RDF baik dalam bentuk *fluffy* maupun briket dapat disimpulkan hal-hal berikut:

a. Kualitas Energi dan Efisiensi

RDF dari sampah lama dari *landfill mining* memiliki nilai kalor tertinggi dibandingkan RDF dari sampah baru dari MSW, dengan nilai mencapai 4.289,6 kcal/kg, memenuhi baku mutu SNI 8966:2021 Kelas 2. RDF dalam bentuk *fluffy* menunjukkan nilai kalor rata-rata di atas standar minimum industri semen (3.400 kcal/kg), meskipun kadar airnya masih melebihi batas maksimum (20%). RDF dalam bentuk briket juga menunjukkan nilai kalor yang bervariasi, tergantung pada bahan baku dan campurannya. Kalori paling optimal tertinggi berasal dari campuran RDF dengan batubara muda sebesar 4.257,44 kcal/kg), meskipun kadar abu masih tinggi dan belum memenuhi standar SNI.

b. Parameter Lingkungan

Hasil uji TCLP menunjukkan bahwa kandungan logam berat seperti merkuri, kadmium, dan timbal pada RDF berada dalam batas aman menurut PP No. 22 Tahun 2021, sehingga aman untuk digunakan sebagai bahan bakar dari segi lingkungan.

c. Potensi Pemanfaatan Industri

RDF dalam bentuk *fluffy* dari TPST Bantargebang telah berhasil diserap oleh industri semen dalam jumlah signifikan, yaitu hingga 700 ton/hari, hal ini membuktikan bahwa RDF dapat dimanfaatkan secara nyata sebagai substitusi batubara di sektor industri energi-intensif, sekaligus mendukung pengurangan emisi GRK hingga 30% sebagaimana didukung oleh beberapa studi.

d. Tantangan dan Peluang

Kualitas RDF masih menghadapi tantangan, terutama dari kadar air dan abu yang tinggi, serta komposisi sampah yang heterogeny, namun, kombinasi RDF dengan bahan lain seperti batubara muda atau arang serat sawit menunjukkan peluang untuk peningkatan kualitas energi. Pemilihan bahan baku, proses pengeringan, serta kontrol terhadap kandungan abu sangat penting untuk meningkatkan performa RDF.

2.4.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan terhadap pemanfaatan RDF dari TPST Bantargebang, maka didapat beberapa saran sebagai berikut:

a. Optimalisasi Proses Produksi RDF

Diperlukan peningkatan pada proses pengeringan dan pemilahan material agar kadar air dan kadar abu RDF dapat ditekan hingga memenuhi standar mutu, khususnya untuk kebutuhan industri seperti semen dan pembangkit listrik. Penggunaan teknologi pengeringan mekanik atau *thermal drying* secara lebih intensif dapat menjadi solusi untuk menurunkan kadar air.

- b. Pengembangan Teknologi Briket RDF
Produksi RDF dalam bentuk briket perlu terus dikembangkan dengan memperhatikan komposisi bahan baku, jenis perekat, dan parameter produksi seperti tekanan dan suhu karbonisasi. Briket dari campuran RDF dan batubara muda atau serat sawit menunjukkan potensi yang baik dan layak untuk dikembangkan lebih lanjut.
- c. Standarisasi dan Pengendalian Mutu
Pemerintah bersama pihak industri perlu menyusun dan menerapkan standar mutu RDF yang lebih komprehensif, mengingat heterogenitas bahan baku. Pengawasan mutu secara berkala penting dilakukan untuk menjaga konsistensi kualitas RDF yang diproduksi.
- d. Kolaborasi dengan Industri dan Swasta
Diperlukan kerja sama jangka panjang antara pemerintah, pengelola RDF *Plant*, dan pihak industri sebagai *off-taker*, untuk menjamin kontinuitas penyerapan RDF. Penyediaan insentif bagi industri yang menggunakan RDF sebagai bahan bakar alternatif juga dapat mendorong pemanfaatan lebih luas.
- e. Edukasi dan Sosialisasi Pengelolaan Sampah
Perlu adanya upaya edukatif kepada masyarakat terkait pentingnya pemilahan sampah sejak dari sumber. Kualitas RDF sangat bergantung pada bahan baku yang masuk ke TPST, sehingga keterlibatan masyarakat dapat memberikan kontribusi nyata dalam peningkatan kualitas RDF.
- f. Kajian Lanjutan
Untuk meningkatkan kualitas RDF dan memperluas penerapannya, perlu dilakukan optimalisasi proses produksi (pengeringan, pencampuran, dan pencacahan), standarisasi komposisi bahan baku, serta dukungan kebijakan dan kemitraan dengan industri. RDF terbukti sebagai solusi ganda dalam pengelolaan limbah dan dekarbonisasi energi, sehingga perlu didorong sebagai bagian integral dari strategi transisi energi di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A., Kumari, M., Manisha, M., et al. (2024). *[Judul penelitian tidak dicantumkan]*.
- Ali, M. F., Qureshi, T. M., & Ahmed, M. (2020). Waste to energy: A sustainable approach for municipal solid waste management and energy recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109781.
- Arni, F., et al. (2014). Pengaruh tekanan dan komposisi bahan terhadap kualitas briket arang tempurung kelapa. *Jurnal Teknologi*, 6(2), 113–120.
- Bhatia, S. K., et al. (2020). A review on RDF: Solid waste management and energy recovery. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 12350–12365.
- Bhuvaneswari, R., et al. (2022). Utilization of RDF in cement industry for reduction of carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130832.
- BSN. (2016). *SNI 01-6235-2000: Briket Arang Kayu*. Badan Standardisasi Nasional.
- Caputo, A., et al. (2002). Refuse-derived fuel production and utilization. *Applied Thermal Engineering*, 22(4), 423–437.
- Chatziaras, N., Psomopoulos, C. S., & Themelis, N. J. (2015). Use of alternative fuels in cement industry. *Fuel Processing Technology*, 130, 228–236.
- Christensen, T. H. (2011). *Solid Waste Technology & Management*. Wiley-Blackwell.
- Diaz, L. F., Savage, G. M., & Eggerth, L. L. (1996). *Solid Waste Management for Economically Developing Countries*. ISWA.
- Damanhuri, E., & Padmi, T. (2019). *Pengelolaan Sampah Terpadu*. ITB Press.
- Gunadi, I., et al. (2023). RDF sebagai solusi pengolahan limbah dan alternatif energi di perkotaan. *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 15(2), 45–54.
- Ifa, L., et al. (2020). Potensi briket dari tempurung kelapa sebagai bahan bakar alternatif. *Jurnal Riset Teknologi*, 8(1), 21–28.
- Idris, S., et al. (2021). Studi karakterisasi briket dari batubara muda terkarbonisasi. *Jurnal Energi Terbarukan Indonesia*, 10(3), 99–106.
- Kalayan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359.
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H., & Hofbauer, H. (2013). *Energy from Biomass: Fundamentals, Techniques and Applications*. Springer.
- Kementerian ESDM. (2021). *Outlook Energi Indonesia 2021*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Kreith, F., & Tchobanoglous, G. (2002). *Handbook of Solid Waste Management*. McGraw-Hill.
- McDougall, F. (2001). *Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory*. Wiley.
- Nizami, A. S., et al. (2017). Integrated waste management for smart cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1–12.
- Phyu, T. T., et al. (2024). Life cycle GHG emissions of RDF and coal co-combustion. *Journal of Cleaner Energy Systems*, 32(1), 112–120.
- Rahardja, A. B., et al. (2022). Karakterisasi briket dari serat sawit untuk bahan bakar alternatif. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 13(2), 70–78.
- Rania, A., et al. (2019). Pengaruh campuran biomassa terhadap nilai kalor briket. *Jurnal Energi dan Teknologi*, 11(1), 58–65.

- Rithy, P., et al. (2017). Waste to energy technologies: A review of RDF utilization. *Renewable Energy*, 105, 368–375.
- Santoso, H., et al. (2023). Pengembangan briket RDF dari campuran sampah plastik dan organik. *Jurnal Teknologi Terapan*, 6(3), 101–110.
- Sulaiman, F., et al. (2020). Comparative study of biomass and coal as fuels for industrial applications. *Renewable Energy*, 145, 643–655.
- Syafrudin, M., et al. (2023). Pengaruh kadar air terhadap efisiensi energi RDF. *Jurnal Energi Alternatif*, 9(2), 78–86.
- Tambaria, A., & Serli, T. (2019). Nilai kalor batubara muda dan potensinya sebagai bahan bakar alternatif. *Jurnal Energi Nusantara*, 7(1), 23–30.
- Themelis, N. J., & Recyclet, M. (2016). Refuse-derived fuel as a sustainable energy source. *Waste Management World*, 17(4), 42–47.
- Widyatmoko, W., et al. (2018). Evaluasi mutu briket dari limbah pertanian. *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 12(2), 77–83.
- Williams, P. T. (2005). *Waste Treatment and Disposal*. Wiley.
- Yunusa, S. U., Mensah, E., Preko, K., et al. (2023). Comparative calorific values of agricultural waste-derived briquettes. *Journal of Renewable Biomass Energy*, 19(1), 15–24.
- Zhang, Y., et al. (2018). Co-firing RDF with coal: Emission and combustion characteristics. *Journal of Environmental Management*, 217, 128–135.
- Zhang, X., et al. (2023). Environmental benefits of RDF utilization in cement industry. *Cleaner Production Journal*, 367, 135938.