

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Pemanfaatan sampah organik dan non-organik sebagai bahan bakar alternatif yang telah banyak diteliti, berikut merupakan sebagian penelitian yang telah dilakukan, diantaranya:

Tabel 2. 1 *Studi Literatur*

No	Penulis & Tahun	Judul	Pembahasan Penelitian
[3]	Saputra, et, al. 2023	"Pengaruh Jenis Starter Terhadap Produktivitas dan Nilai Kalor Biogas Sampah Organik"	membahas mengenai pengaruh jenis starter terhadap produktivitas biogas, warna nyala api hasil pembakaran biogas dan nilai kalor biogas yang dihasilkan. pengaruh jenis starter dalam pembuatan biogas dari sampah organik pasar dan limbah sayuran untuk mengetahui jenis starter yang paling cocok digunakan dan untuk mendapat hasil paling optimal.
[4]	Ahzan, et, al. 2021	"PENGEMBANGAN BRIKET BERBAHAN DASAR ECENG GONDOK DAN ABU SEKAM PADI SEBAGAI ALTERNATIF BAHAN BAKAR OVEN TEMBAKAU"	membahas untuk menghasilkan briket sebagai bahan bakar alternatif oven tembakau. Briket yang dihasilkan ada dua yaitu briket berbahan Dasar Eceng Gondok dan Briket berbahan dasar abu sekam padi. Kedua briket dibuat dengan variasi komposisi bahan perekat tepung tapioka 10% dan bahan dasar 90% untuk mendapatkan hasil briket

			terbaik untuk diterapkan sebagai alternatif bahan bakar pada proses pengovenan tembakau masyarakat.
[5]	Maulana, et, al. 2021	"ANALISIS KINERJA <i>REFUSE DERIVED FUEL</i> (RDF) DARI SAMPAH ORGANIK DAN NON ORGANIK DENGAN PENDEKATAN SIMULASI <i>SOFTWARE</i> "	membahas mengenai analisis kinerja RDF dari sampah organik dan non organik dengan pendekatan simulasi software. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan data kinerja RDF yang akan menjadi acuan komposisi sampah yang dibutuhkan melalui metode kombinasi perhitungan teoritis dan analisis simulasi, sehingga akan dihasilkan RDF yang lebih optimal.
[6]	Yang, et, al. 2021	<i>"Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review"</i>	kemajuan terbaru dalam gasifikasi bahan bakar yang berasal dari sampah untuk produksi energi dan kesenjangan penelitian yang ada yang perlu diisi oleh penelitian di masa depan. Tinjauan ini mencakup upaya yang ada dalam produksi bahan bakar dari sampah di beberapa negara, kemajuan terbaru gasifikasi bahan bakar dari sampah untuk produksi energi, pemodelan gasifikasi, penilaian ekonomi serta tantangan dan prospek masa depan dari teknologi ini.
[7]	Rahmat, 2023	"Analisis Pemanfaatan Sampah Organik	pelatihan masyarakat untuk produksi reaktor biogas mengungkapkan hal

		Menjadi Energi Alternatif Biogas”	ini. Meski berpotensi sebagai sumber energi terbarukan, masyarakat umum masih awam dengan kemungkinan memanfaatkan sampah atau sampah organik dari barang-barang biasa seperti kayu, dedaunan, dan sebagainya. Biogas, yang berasal dari bahan organik yang membusuk, memiliki potensi sebagai sumber energi yang bersih dan terbarukan. Pupuk organik alami adalah penggunaan lain yang layak untuk limbah yang dihasilkan oleh reaktor biogas.
[8]	Rahmatullah, et, al. 2023	”Pembuatan Biobriket dari Eceng Gondok dan Ampas Kopi dengan Metode Pirolisis Sebagai Bahan Bakar Alternatif”	pembuatan biobriket berbahan eceng gondok dan ampas kopi dengan metode pirolisis sebagai bahan bakar alternatif. Eceng gondok dan ampas kopi merupakan bahan baku biobriket yang mengandung selulosa serta dapat dikarbonisasi sehingga diharapkan dapat menghasilkan biobriket dengan kualitas baik. Sampel biobriket akan divariasikan berdasarkan perlakuan perbedaan ukuran partikel serta komposisi dari arang eceng gondok dan arang ampas kopi. Analisa parameter uji yang dilakukan nantinya digunakan untuk menentukan suhu dan waktu tahan pirolisis serta komposisi maksimum

			untuk meningkatkan kualitas biobriket eceng gondok dan ampas kopi ini yang diharapkan sesuai dengan standar biobriket menurut SNI 1-6235-2000.
[9]	Fiki, et, al. 2022	”Teknologi Biodrying untuk Meningkatkan Nilai Kalor Sampah dan Proyeksinya sebagai Bahan Bakar Alternatif pada Tahun 2028”	mengolah MSW menggunakan biodrying dan menghitung potensi MSW sebagai bahan bakar alternative. MSW dari Jatibarang landfill diolah dalam reaktor bio-drying dengan debit aerasi sebesar 6 L/m selama 21 hari. Hasil penelitian menunjukkan suhu puncak mencapai 58°C pada hari pertama. Kadar air mengalami penurunan hingga 44,65% pada hari ke-21. Nilai kalor mengalami kenaikan 28% dengan nilai tertinggi sebesar 6.049 kal/gr. Produk biodrying dari MSW Jatibarang landfill memiliki potensi 138% sebagai bahan bakar industry.
[10]	Diana, et, al. 2018	<i>”Production and characterization refuse derived fuel (RDF) from high organic and moisture contents of municipal solid waste (MSW)”</i>	tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan RDF dari kandungan organik dan kadar air yang tinggi pada MSW, mengkarakterisasi sifat-sifatnya, dan menyelidiki apakah komposisi limbah organik cocok untuk produksi RDF. Temuan dari penelitian ini sangat penting untuk pengembangan

			pengelolaan limbah, terutama di negara-negara berkembang.
[11]	Hongthong, et, al. 2024	<i>"Enhanced Biochar Production via Co-Pyrolysis of Biomass Residual with Plastic Waste after Recycling Process"</i>	Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki proses kopyrolisis bersama limbah daur ulang mikroplastik polipropilena (PP), serbuk gergaji, dan biomassa kayu keras untuk menghasilkan komposit arang bio dan mengkarakterisasi sifat fisik-kimia, struktural, dan permukaannya.
[12]	Khatibi, et, al. 2025	<i>"Pyrolysis/Non-thermal Plasma/Catalysis Processing of Refuse-Derived Fuel for Upgraded Oil and Gas Production"</i>	Bahan bakar dari sampah (RDF) yang dihasilkan dari pengolahan sampah padat kota (MSW) memiliki kandungan biomassa dan plastik yang tinggi. Pirolisis RDF menghasilkan bio-minyak yang sangat teroksigenasi, kental, asam dengan kadar air yang tinggi dan tidak cocok untuk digunakan langsung dalam sistem pembakaran konvensional, sehingga memerlukan peningkatan kualitas. Sebuah proses baru pirolisis dengan plasma non-termal/katalisis telah dikembangkan untuk menghasilkan bio-minyak dan gas yang terdeoksigenasi dari RDF. Volatil dari tahap pirolisis dialirkan langsung ke reaktor plasma non-termal/katalitik di mana peningkatan

			kualitas volatil pirolisis terjadi. Analisis mendetail terhadap minyak dan gas produk disajikan terkait dengan kondisi proses dan dalam keberadaan katalis yang berbeda (TiO_2, MCM-41, ZSM-5, dan Al_2O_3).
[13]	Santos, et, al. 2023	<i>"Brief Overview of Refuse-Derived Fuel Production and Energetic Valorization: Applied Technology and Main Challenges"</i>	menganalisis status produksi MSW dan RDF, serta tujuan utamanya di Portugal dan Eropa. Peraturan yang diterapkan, kemungkinan jalur pemulihan energi, dan tantangan yang terkait dengan pemulihan energi dibahas dalam makalah ini. Penelitian ini menemukan bahwa produksi RDF di Portugal selama ini kurang diperhatikan, sebagian besar karena komposisi RDF yang sangat heterogen dan sifat bahan bakarnya yang kurang baik. Oleh karena itu, kebutuhan untuk meningkatkan dan memperbaiki karakteristik serta sifat RDF untuk proses konversi limbah menjadi energi teridentifikasi.
[14]	Et, al. 2021	"Pemanfaatan Eceng Gondok (Eichhornia Crassipes) untuk Briket Sebagai Bahan Bakar Energi Alternatif di Kelurahan Panji Sari, Lombok Tengah"	Pembuatan briket menggunakan eceng gondok sebagai bahan utama yang ditunjang dengan bahan lain dari kulit biji kenari, sekam padi, ranting kayu, serta tepung tapioka sebagai perekatnya. Hasil dari pembuatan briket eceng gondok

			dapat dimanfaatkan masyarakat sebagai pengganti arang batok kelapa yang digunakan masyarakat dalam kehidupan sehari-hari sebagai bahan bakar serta pembuatan briket akan dapat memberikan nilai ekonomis tinggi bagi masyarakat khususnya di Kelurahan Panji Sari.
[15]	Naura, et, al. 2025	ANALISIS KELAYAKAN RDF (REFUSE DERIVED FUEL) SEBAGAI BAHAN BAKAR PENGGANTI BATUBARA DI PT SEMEN GRESIK PABRIK REMBANG	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan RDF terhadap kestabilan proses meliputi temperatur stage 5 preheater, torsi kiln, dan pressure inlet kiln, serta kualitas klinker pada parameter free lime, C3S, dan C2S yang dihasilkan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode deskriptif -kuantitatif dengan mengolah data dari Control Room PT Semen Gresik Rembang. RDF yang dihasilkan dapat menjadi bahan bakar alternatif karena memenuhi syarat dengan nilai kalor sebesar 4.811 kkal/kg, dan nilai moisture sebesar 9,5%. Hasil analisis kestabilan operasi setelah pemasukan RDF pada parameter temperatur stage 5 preheater menunjukkan kondisi yang stabil, torsi kiln menunjukkan kondisi yang fluktuatif dengan

			nilai standar deviasi yang lebih rendah, pressure inlet kiln menunjukkan kondisi yang fluktuatif, hingga indeks kebutuhan batubara yang menurun sebesar 0,01 ton batubara/ton klinker. Analisis kualitas klinker menunjukkan hasil yang semakin baik setelah pemasukan RDF apabila ditinjau dari parameter free lime yang nilainya berkisar dari 1 – 1,5% kurang dari batas maksimal (2%), serta kuat tekan semen yang semakin baik ditinjau dari kandungan C3S dan C2S-nya. Oleh karena itu, RDF dapat memenuhi klasifikasi sebagai bahan bakar alternatif pengganti batubara.
[16]	Khoiro Ummatin, et, al. 2021	ANALISA PERILAKU RUMAH TANGGA DALAM MENGOLAH SAMPAH SEBAGAI UPAYA MENDUKUNG ENERGI ALTERNATIF REFUSE DERIVED FUEL (RDF)	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan menganalisis beberapa faktor yang mempengaruhi perilaku rumah tangga dalam mengolah sampah di Kabupaten Tuban. Wilayah ini dipilih menjadi obyek penelitian karena terdapat 2 industri semen besar yang dapat menggunakan RDF sebagai bahan bakarnya. Survey dilakukan pada 110 responden, dan didapatkan hasil dengan uji regresi linear berganda,

			nilai koefisien terbesar sebesar 0,232 adalah variabel fasilitas pengolahan sampah, disusul variabel pengetahuan pengolahan sampah sebesar 0,197, variabel kesadaran rumah tangga dalam mendukung pengolahan sampah sebesar 0,082, dan variabel peran pemerintah sebesar 0,221.
[17]	Tekling, et.al. 2024	Evaluasi Produksi Refuse-Derived Fuel(RDF) dari Sampah Perkotaan (Studi Kasus: RDF Plant di Kabupaten Cilacap)	Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan proses pembuatan dan produksi RDF untuk industri semesta memberikan rekomendasi untuk pembuatan standar nasional. Prosedur penelitian ini mencakup identifikasi komposisi dan karakteristik sampah, observasi tahapan proses produksi RDF, dan evaluasi kualitas produk RDF seperti kadar air, kadar abu, dan nilai kalor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa RDF Plant Cilacap berhasil memproduksi RDF dari sampah kota menggunakan metode mechanical-biological treatment (MBT). Proses bio drying mampu menurunkan kadar air sampah dari 55,44% menjadi 23,63% dan meningkatkan nilai kalornya menjadi sekitar 15 MJ/kg. Namun, kualitas produk RDF masih perlu ditingkatkan untuk memenuhi standar biomassa untuk industri (SNI 8675:2018). Produk RDF Plant Cilacap dinilai cukup layak untuk industri semesta.

			en, dengan beberapa rekomendasi untuk peningkatan kualitas produk dan optimalisasi proses produksi. Temuan ini diharapkan dapat menjadi rujukan dalam pembuatan standar nasional dalam produksi RDF sebagai bahan bakar alternatif di industri semen.
[18]	Daru, et. al. 2020	Model Prediksi Nilai Panas Tinggi Biobriket Daun Kesambi (<i>Schleichera oleosa</i>) Torrefied	Penelitian ini membahas pentingnya biomassa daun kesambi sebagai sumber energi terbarukan, serta mengkaji potensi biobriket sebagai alternatif bahan bakar yang lebih berkelanjutan dibandingkan biomassa kayu tradisional. Dalam upaya mengatasi keterbatasan biomassa mentah, penelitian ini berfokus pada pengembangan model statistik untuk memprediksi nilai kalor yang lebih tinggi (Higher Heating Value/HHV) dari biobriket daun kesambi berdasarkan rasio perekat dan ukuran partikel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio perekat dan ukuran partikel memiliki dampak signifikan

			terhadap HHV biobriket. Model yang dikembangkan mampu memberikan prediksi HHV yang akurat, menunjukkan bahwa optimasi rasio perekat dan ukuran partikel dapat meningkatkan efisiensi energi biobriket. Berdasarkan analisis di atas, maka Model Nhuchhen (2012) dapat dianggap sebagai model terbaik karena mempunyai nilai R² yang tinggi dan nilai Adjusted R² (0,93 dan 0,87), menunjukkan akurasi yang baik, menunjukkan kurangnya kecocokan yang tidak signifikan, menunjukkan kecocokan model yang baik, memiliki presisi cukup tinggi (12,56), menunjukkan presisi yang baik, dan memberikan prediksi HHV yang tinggi dan akurat (29,84 MJ/kg $\pm$ 0,21). Oleh karena itu, model Nhuchhen memberikan kombinasi akurasi, kesesuaian, presisi, dan prediksi yang memadai yang terbaik untuk digunakan dalam memprediksi nilai HHV biobriket daun kesambi.
--	--	--	--

[19]	Subardi, et, al. 2019	Optimalisasi Pemanfaatan Limbah Pertanian sebagai Energi Alternatif Binderless Biobriquette	Uji coba pembriketan menggunakan mesin tipe heated die screw extruder pada putaran 30 rpm dan penggerak berdaya 3 PK. Karbonisasi dilakukan terhadap 7 varian sampel biobriket terseleksi, dengan metode pirolisis di bawah nitrogen. Pengujian meliputi uji proximate, nilai kalor dan uji pembakaran sampel biobriket terseleksi baik yang sebelum maupun sesudah dikarbonisasi. Uji pembakaran menggunakan metode macro-TGA dengan laju kenaikan temperatur 10 oC dalam lingkungan udara dan berat sampel 15 gram. Data diperoleh berupa penurunan massa dan perubahan temperatur yang tercatat otomatis pada software RS-Key, Ms Excel dan Adam NET Utility untuk dianalisis grafis kuantitatif. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan karakteristik proximate dan nilai kalor sampel biobriket setelah dilakukan karbonisasi. Rerata laju reaksi terbesar pada sampel biobriket tongkol jagung non-karbonisasi dan campuran kulit singkong-grajen sengan karbonisasi masing-masing $5,69 \times 10^{-3} \text{g/s}$ dan $4,01 \times 10^{-3} \text{g/s}$. Energi aktivasi terkecil diperoleh dari
------	-----------------------	---	--

			pembakaran biobriket tongkol jagung non-karbonisasi sebesar 19,93 kJ/mol dan campuran tongkol jagung-grajen sengan sebesar 10,77 kJ/mol. Proses dekomposisi lignoselulosa biobriket terkarbonisasi terjadi pada suhu yang lebih tinggi serta durasi pembakaran karbon terikat lebih lama dibanding biobriket non-karbonisasi.
--	--	--	--

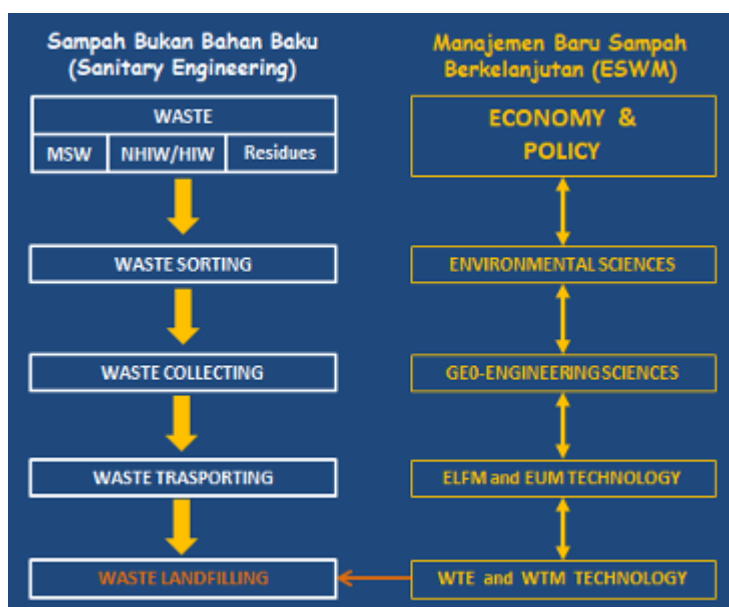
2.2 Landasan Teori

Sampah merupakan salah satu permasalahan bagi lingkungan karena terus menerus meningkat seiring bertambahnya populasi dan aktivitas manusia. Berdasarkan sifatnya, sampai ini terbagi menjadi dua kategori yaitu sampah organik dan sampah non-organik. Sampah organik adalah limbah yang berasal dari sisa makhluk hidup dan bersifat mudah terurai, sedangkan sampah non-organik sulit terurai namun memiliki potensi energi yang tinggi jika dikelola secara tepat. Pemanfaatan kedua jenis sampah untuk menjadi bahan bakar padat dapat menjadi solusi untuk penyediaan energi baru terbarukan sekaligus pengelolaan limbah.

Merujuk dari pembahasan materi (ITPLN, 2023) yang menyatakan bahwa sampah tidak hanya dipandang sebagai limbah, tetapi juga sebagai sumber energi yang dapat dimanfaatkan melalui konsep *Waste to Energy* (WtE). Teknologi WtE merupakan proses konversi limbah padat menjadi energi listrik, panas, maupun bahan bakar alternatif melalui metode termal atau biologis. Pemanfaatan teknologi ini mampu mengurangi volume sampah sekaligus meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya energi.

Selain itu, (ITPLN, 2023) menjelaskan bahwa sampah perkotaan mengandung energi kimia yang berasal dari material organik maupun material berbasis polimer seperti plastik. Energi tersebut dapat dilepaskan melalui proses

pembakaran maupun proses konversi termokimia lainnya sehingga berpotensi digunakan sebagai bahan bakar alternatif.



Gambar 2. 1 Konsep penyempurnaan manajemen sampah yang berkelanjutan

2.2.1 Sampah Sebagai Sumber Energi

Sampah perkotaan merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk, urbanisasi, dan perubahan pola konsumsi masyarakat. Dalam konsep pengelolaan modern, sampah tidak lagi dipandang sebagai limbah yang harus dibuang, tetapi sebagai sumber daya yang memiliki potensi energi. Pemanfaatan energi dari sampah dikenal dengan istilah *Waste to Energy* (WtE), yaitu proses konversi sampah menjadi energi listrik, panas, atau bahan bakar alternatif melalui proses termal maupun biologis.

Secara umum, potensi energi dari sampah sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan kimia bahan penyusunnya, terutama kandungan material organik. Sampah organik memiliki kandungan karbon dan hidrogen yang tinggi sehingga berpotensi menghasilkan energi kalor yang besar. Sebaliknya, kandungan material anorganik cenderung berfungsi sebagai material *inert* yang dapat menurunkan efisiensi pembakaran. Oleh karena itu, pengolahan sampah

2.2.1.1 Sampah Organik dan Non-Organik

Karakteristik perbedaan antara sampah organik dan non-organik tersebut menunjukkan bahwa pengolahan limbah menjadi bahan bakar alternatif memerlukan pendekatan teknologi yang tepat agar mampu mengoptimalkan potensi energi yang terkandung di dalamnya. Kombinasi kedua jenis sampah sering dimanfaatkan dalam proses produksi bahan bakar padat karena mampu menyeimbangkan kelemahan masing-masing material.

Sampah organik berperan dalam menyediakan komponen biomassa yang mudah terurai dan relatif ramah lingkungan, sedangkan sampah non-organik seperti plastik berkontribusi dalam meningkatkan nilai kalor bahan bakar. Oleh karena itu, pengolahan limbah menjadi energi tidak hanya bertujuan untuk mengurangi volume sampah, tetapi juga untuk meningkatkan nilai guna material limbah melalui proses konversi energi.

Sejalan dengan konsep tersebut, pemanfaatan limbah organik sebagai sumber energi erat kaitannya dengan penggunaan biomassa sebagai bahan bakar alternatif. Merujuk Penelitian (Nugroho, 2022) yang menjelaskan bahwa biomassa merupakan material organik yang berasal dari makhluk hidup seperti limbah pertanian, limbah kehutanan, serta sampah organik perkotaan yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan. Biomassa termasuk sumber energi berkelanjutan karena dapat diperbaharui melalui proses biologis secara alami. [21]

Lebih lanjut, (Nugroho, 2022) menyatakan bahwa pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar dapat dilakukan melalui berbagai metode konversi energi seperti pembakaran langsung, gasifikasi, pirolisis, dan fermentasi. Karakteristik biomassa seperti kadar air, kandungan karbon, dan nilai kalor sangat mempengaruhi efisiensi proses konversi energi yang dihasilkan. [21]

Dengan demikian, pemilihan jenis biomassa serta metode pengolahannya menjadi faktor penting dalam menentukan kualitas bahan bakar

yang dihasilkan. Pengolahan biomassa yang optimal tidak hanya mampu meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga berkontribusi dalam menekan emisi gas rumah kaca serta mendukung pengembangan sistem energi yang lebih berkelanjutan.



Gambar 2. 3 Sumber Energi Biomassa

2.2.2 *Refuse Derived Fuel* (RDF)

Merujuk dari (ITPLN, 2023) yang menjelaskan bahwa *Refuse Derived Fuel* (RDF) merupakan bahan bakar alternatif yang dihasilkan dari proses pengolahan sampah melalui tahapan pemilahan, pencacahan, pengeringan, dan pemadatan. Proses pengolahan RDF bertujuan meningkatkan homogenitas bahan bakar serta memperbaiki karakteristik pembakaran.

Kualitas RDF sangat dipengaruhi oleh komposisi bahan penyusunnya. (ITPLN, 2023) juga menyatakan bahwa RDF umumnya terdiri dari campuran sampah organik dan material non-organik seperti plastik dan kertas yang memiliki nilai kalor relatif tinggi. Pemanfaatan RDF dapat meningkatkan efisiensi pembakaran serta mengurangi volume sampah yang masuk ke tempat pembuangan akhir. Oleh karena itu, pengendalian komposisi RDF menjadi faktor

utama dalam menentukan efisiensi pembakaran serta kestabilan sistem energi yang dihasilkan.

Selain itu, RDF juga memiliki keuntungan dalam mengurangi volume sampah yang masuk ke tempat pembuangan akhir serta mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Namun, proses produksi RDF memerlukan sistem pengolahan yang terintegrasi agar kualitas bahan bakar yang dihasilkan tetap konsisten. [22]

Menurut (PT. CENTRA REKAYASA ENVIRO) RDF berkualitas baik adalah RDF yang memiliki nilai kalor yang tinggi dan konsentrasi senyawa toksik yang rendah, Sumber dari jenis material yang digunakan untuk RDF berpengaruh terhadap kualitas akhir RDF yang diperoleh. Misalnya, sampah domestik hanya mampu diolah menjadi RDF dengan nilai kalor rata-rata 3000 kkal/kg. Perbandingan kualitas akhir RDF berdasarkan sumber sampahnya dapat dilihat pada Tabel berikut. [23]

SUMBER	NILAI KALOR (KKAL/KG)	KADAR AIR (%)	KADAR ABU (%)	KLOR (%)	SULFUR (%)
PEMUKIMAN	2.868 - 3.824	10-35	15-20	0.5-1	-
KOMERSIL	3.824 - 4.780	10-20	5-7	<0.1-0.2	<0.1
INDUSTRI	4.302,1 - 5.019,1	3-10	10-15	0.2-1	-

Gambar 2. 4 kualitas akhir RDF berdasarkan sumber sampahnya

2.2.2.1 Karakteristik Bahan Baku RDF

Bahan baku RDF berasal dari *Municipal Solid Waste* (MSW) yang memiliki komposisi heterogen antara fraksi organik dan non-organik. Komponen non-organik seperti plastik, tekstil, dan kertas memiliki kontribusi besar terhadap nilai kalor RDF karena mengandung karbon dan volatil yang tinggi. Sebaliknya, kandungan organik berperan dalam meningkatkan stabilitas pembakaran meskipun sering memiliki kadar air tinggi. Parameter tersebut menentukan performa pembakaran serta efisiensi konversi energi pada sistem WTE. Kadar ini sangat beragam bergantung kepada sumber limbah (seperti rumah tangga, kantor, konstruksi, dan lain-lain), bergantung pada cara

pengumpulan, dan pengolahan yang diterapkan (screening, pemilahan, grinding, pengeringan). [24]

Biogenik	Bukan-biogenik
Kertas percetakan	Plastik *)
Kertas	PET
Karton dan kemasan	LDPE/LLDPE
Tekstil	HDPE
Rabasan pekarangan	PP
Sampah makanan	PS
Kayu	PVC
Kulit	Jenis plastik lainnya
Jenis biogenik lainnya	Karet
	Jenis bukan-biogenik lainnya

*) untuk singkatan nama plastik silahkan melihat di pustaka lainnya

Gambar 2. 5 Jenis kandungan biogenik di dalam MSW

Menurut penelitian (Hutagalung,et.al. 2024), Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas RDF sangat dipengaruhi oleh komposisi bahan baku serta metode pengolahan yang digunakan. Selain itu, menurut penelitian (Jeariska,et.al. 2025) karakterisasi RDF menunjukkan bahwa variasi komposisi organik dan non-organik dapat menghasilkan perbedaan signifikan terhadap kandungan karbon terikat, volatil matter, serta kandungan abu yang berdampak langsung pada nilai kalor bahan bakar. [25]

2.2.3 Tahapan Sistem Produksi RDF

Sistem produksi RDF dirancang untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi dari limbah sekaligus mengurangi volume sampah yang dibuang ke tempat pemrosesan akhir. Secara umum, tahapan produksi RDF melibatkan serangkaian proses mekanis dan termal yang bertujuan untuk memisahkan material bernilai energi dari komponen yang tidak dapat terbakar.



Gambar 2. 6 Proses pengolahan sampah menjadi RDF

2.2.3.1 Pemilahan Sampah (*Waste Sorting*)

Tahap awal produksi RDF adalah pemilahan sampah berdasarkan jenis material. Pada tahap ini, sampah yang berasal dari berbagai sumber seperti rumah tangga, komersial, maupun industri dikumpulkan dan diangkut menuju fasilitas pengolahan RDF. Sampah yang diterima biasanya masih dalam kondisi tercampur sehingga diperlukan proses sortasi awal untuk menghilangkan material berbahaya, logam, kaca, serta material inert lainnya yang dapat mengganggu proses pengolahan maupun menurunkan kualitas bahan bakar yang dihasilkan.

Pemilahan dilakukan untuk memisahkan material yang dapat terbakar dari material inert seperti logam, kaca, dan batu. Proses ini bertujuan meningkatkan kualitas RDF sekaligus melindungi peralatan produksi dari kerusakan. Pemilahan dapat dilakukan secara manual maupun mekanis menggunakan teknologi separator seperti magnetic separator, air classifier, dan ballistic separator. Efektivitas pemilahan sangat menentukan kualitas RDF karena komposisi bahan baku mempengaruhi nilai kalor dan karakteristik pembakaran. [26]

2.2.3.2 Proses Pencacahan (*Shredding Process*)

Tahapan berikutnya adalah proses pencacahan atau penghancuran material sampah. Setelah proses pencacahan, sampah umumnya melalui proses pemisahan lanjutan untuk memisahkan fraksi organik basah dengan fraksi kering yang memiliki potensi energi lebih tinggi. Setelah proses pemilahan, sampah akan dicacah menggunakan mesin *shredder* untuk memperkecil ukuran partikel.

Proses pencacahan bertujuan meningkatkan homogenitas material serta mempermudah proses pengeringan dan peletisasi. Ukuran partikel yang seragam dapat meningkatkan efisiensi pembakaran karena luas permukaan bahan bakar meningkat sehingga reaksi oksidasi dapat berlangsung lebih optimal. [27]

2.2.3.3 Proses Pengeringan (*Drying Process*)

Selanjutnya, material yang telah diseleksi akan memasuki tahap pengeringan. Proses pengeringan bertujuan untuk menurunkan kadar air material, karena kadar air yang tinggi dapat menurunkan nilai kalor serta menurunkan efisiensi pembakaran. Penurunan kadar air merupakan faktor penting dalam meningkatkan kualitas RDF karena secara langsung mempengaruhi stabilitas pembakaran dan efisiensi energi yang dihasilkan.

Kadar air merupakan salah satu parameter utama dalam menentukan kualitas RDF. Sampah dengan kadar air tinggi akan menurunkan nilai kalor serta mengurangi efisiensi pembakaran. Oleh karena itu, proses pengeringan diperlukan untuk menurunkan kadar air hingga batas tertentu agar bahan bakar dapat terbakar secara stabil. Metode pengeringan RDF dapat dilakukan melalui *biodrying* maupun pengeringan mekanis. *Biodrying* memanfaatkan aktivitas mikroorganisme untuk mengurangi kadar air secara alami, sedangkan pengeringan mekanis menggunakan panas eksternal untuk mempercepat proses penguapan air. [28]

Proses *biodrying* berlangsung melalui beberapa tahapan utama, yaitu:

1. Tahap awal aktivitas biologis

Pada tahap ini, mikroorganisme aerob mulai mendekomposisi fraksi organik yang terdapat dalam limbah. Aktivitas biologis tersebut menghasilkan energi panas yang memicu peningkatan temperatur material. [29]

2. Tahap evaporasi dan penurunan kadar air

Energi panas yang terbentuk selama proses biodegradasi berperan dalam mempercepat penguapan air dari limbah. Proses ini didukung oleh sistem

aerasi yang berfungsi mengalirkan udara sekaligus mengeluarkan uap air dari material. [29]

3. Tahap stabilisasi dan penurunan suhu

Setelah kandungan air berkurang secara signifikan, aktivitas mikroorganisme secara bertahap menurun. Pada fase ini dihasilkan produk akhir yang memiliki tingkat kekeringan lebih tinggi dan kondisi material yang lebih stabil. [29]

Keberhasilan proses *biodrying* dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, antara lain:

1. Komposisi limbah

Jenis dan karakteristik limbah sangat menentukan efektivitas proses pengeringan. Limbah dengan kadar air tinggi umumnya membutuhkan waktu pengolahan lebih lama dibandingkan limbah dengan kandungan bahan organik yang lebih rendah. [30]

2. Sistem aerasi dan ventilasi

Sirkulasi udara yang optimal diperlukan untuk menjaga kondisi aerobik tetap stabil sekaligus membantu mengeluarkan kelembaban dari material limbah. [30]

3. Kondisi suhu dan kelembaban

Peningkatan suhu dapat mempercepat proses pengeringan, namun suhu yang terlalu tinggi berpotensi menurunkan aktivitas mikroorganisme karena dapat menyebabkan kematian mikroba yang berperan dalam proses biodegradasi. [31]

4. Rasio C/N (Carbon to Nitrogen)

Perbandingan karbon dan nitrogen berpengaruh terhadap kecepatan dekomposisi bahan organik serta efisiensi pembentukan panas selama proses *biodrying* berlangsung. [31]

2.2.3.4 Proses Homogenisasi dan Pencampuran (*Mixing Process*)

Tahapan akhir dalam produksi RDF adalah proses pembentukan dan pemadatan bahan bakar. Material yang telah kering dan homogen selanjutnya diproses melalui sistem densifikasi seperti *pelletizing* atau *briquetting* untuk

menghasilkan RDF dalam bentuk pelet atau briket. Tahapan homogenisasi dilakukan untuk memastikan distribusi material yang merata antara fraksi organik dan non-organik. Proses ini penting untuk menghasilkan bahan bakar dengan karakteristik fisik dan kimia yang seragam. Homogenisasi dapat meningkatkan kestabilan pembakaran serta mengurangi fluktuasi temperatur pada sistem pembakaran WTE. [32]

(Nugroho, 2022) menjelaskan bahwa peletisasi merupakan proses pemadatan bahan bakar berbentuk partikel halus menjadi pelet dengan ukuran dan densitas tertentu. Proses ini bertujuan meningkatkan densitas energi bahan bakar, mempermudah transportasi, serta meningkatkan stabilitas pembakaran bahan bakar padat [21]. Lebih lanjut, (Nugroho, 2022) menyatakan bahwa kualitas pelet sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel bahan baku, kadar air, tekanan pemadatan, serta komposisi material penyusun. Pelet dengan densitas tinggi memiliki nilai kalor per satuan volume yang lebih besar sehingga mampu meningkatkan efisiensi pembakaran pada sistem pembangkit energi biomassa. [21]

Oleh karena itu, proses peletisasi menjadi salah satu tahapan penting dalam sistem produksi RDF karena berperan dalam meningkatkan kualitas energi bahan bakar sekaligus menjaga konsistensi performa pembakaran.

2.2.4 Parameter Kualitas RDF Terhadap Potensi Energi

Kualitas *Refuse Derived Fuel* (RDF) merupakan faktor utama yang menentukan kinerja pemanfaatannya sebagai bahan bakar alternatif dalam sistem konversi energi. RDF yang memiliki karakteristik fisik dan kimia yang baik akan menghasilkan efisiensi pembakaran yang lebih tinggi, stabilitas operasi sistem yang lebih baik, serta potensi produksi energi yang optimal.

Merujuk dari penjelasan (ITPLN, 2023) yang menyatakan bahwa, komposisi material penyusun RDF berpengaruh langsung terhadap kualitas energi bahan bakar. Material organik umumnya memiliki kadar air dan kandungan oksigen yang relatif tinggi, sedangkan material non-organik seperti plastik

memiliki kandungan karbon dan hidrogen yang lebih besar sehingga menghasilkan nilai kalor yang lebih tinggi.

(ITPLN, 2023) juga menjelaskan bahwa ketidakseimbangan komposisi material dapat menyebabkan penurunan performa pembakaran bahan bakar RDF. Oleh karena itu, penentuan komposisi optimum antara material organik dan non-organik menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi sistem *Waste to Energy* serta menjaga stabilitas pembakaran bahan bakar.

Merujuk dari penjelasan berbagai sumber diatas. Secara umum, kualitas RDF dipengaruhi oleh beberapa parameter utama yang saling berkaitan, diantaranya: [24]

1. Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan parameter paling penting dalam menentukan potensi energi RDF karena menggambarkan jumlah energi panas yang dapat dihasilkan selama proses pembakaran. Semakin tinggi nilai kalor suatu RDF, semakin besar energi yang dapat dikonversi menjadi energi termal maupun listrik. Nilai kalor RDF umumnya dipengaruhi oleh komposisi bahan penyusunnya, terutama fraksi organik.

RDF dengan nilai kalor tinggi mampu meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi kebutuhan bahan bakar tambahan dalam sistem pembangkit energi. Selain itu, nilai kalor yang stabil juga berperan dalam menjaga kestabilan temperatur ruang bakar sehingga proses pembakaran dapat berlangsung secara optimal.

2. Kadar Air

Kadar air merupakan salah satu parameter yang sangat mempengaruhi performa pembakaran RDF. Kandungan air yang tinggi akan menurunkan nilai kalor efektif karena sebagian energi panas yang dihasilkan digunakan untuk menguapkan air sebelum proses pembakaran material berlangsung secara sempurna. Kondisi ini menyebabkan efisiensi termal sistem menjadi menurun serta meningkatkan konsumsi energi awal pembakaran.

Selain itu, kadar air yang tinggi dapat menyebabkan kesulitan dalam proses penyalan bahan bakar serta meningkatkan potensi terbentuknya emisi gas buang yang tidak sempurna. Oleh karena itu, proses pengeringan, termasuk melalui metode biodrying, sering diterapkan untuk menurunkan kadar air RDF sehingga meningkatkan kualitas energi yang dihasilkan.

3. Kadar Abu

Kadar abu menunjukkan jumlah residu anorganik yang tersisa setelah proses pembakaran berlangsung. Kandungan abu yang tinggi dapat mengurangi efisiensi pembakaran karena material tersebut tidak menghasilkan energi panas. Selain itu, abu dapat menyebabkan *fouling* dan *slagging* pada sistem pembakaran, yang berpotensi menurunkan efisiensi perpindahan panas serta meningkatkan biaya pemeliharaan peralatan. RDF dengan kadar abu rendah umumnya memiliki karakteristik pembakaran yang lebih baik dan mampu menghasilkan energi yang lebih efisien.

4. Kandungan *volatile matter*

Volatile matter merupakan fraksi material yang mudah menguap dan terbakar pada temperatur relatif rendah. Kandungan *volatile matter* yang tinggi umumnya meningkatkan kemudahan proses penyalan dan mempercepat reaksi pembakaran awal. Parameter ini berperan penting dalam menentukan karakteristik pembakaran RDF, terutama dalam menghasilkan nyala api yang stabil pada tahap awal pembakaran.

Dalam sistem pembakaran RDF, peningkatan kandungan *volatile matter* biasanya berbanding lurus dengan peningkatan nilai kalor bahan bakar. Namun, kandungan abu yang tinggi dapat menurunkan efisiensi pembakaran serta meningkatkan potensi *fouling* dan *slagging* pada sistem pembakaran. [33]

5. *Fixed Carbon*

Fixed carbon merupakan bagian karbon padat yang tersisa setelah *volatile matter* dilepaskan selama proses pemanasan. Komponen ini berperan dalam mempertahankan proses pembakaran jangka panjang karena terbakar lebih lambat dibandingkan *volatile matter*. *Fixed carbon* memberikan kontribusi terhadap kestabilan pembakaran dan mempertahankan temperatur ruang bakar

dalam waktu yang lebih lama. RDF dengan kandungan *fixed carbon* yang seimbang mampu menghasilkan pembakaran yang lebih stabil serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi secara keseluruhan.

2.2.5 Nilai Kalor Bahan Bakar

Nilai kalor merupakan parameter utama dalam menentukan potensi energi suatu bahan bakar. Nilai kalor menggambarkan jumlah energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran sempurna suatu bahan bakar. Nilai kalor dibedakan menjadi dua jenis yaitu *Gross Calorific Value* (GCV) dan *Net Calorific Value* (NCV).

GCV menunjukkan total energi panas yang dihasilkan termasuk energi dari kondensasi uap air hasil pembakaran, sedangkan NCV merupakan energi bersih yang dapat dimanfaatkan setelah dikurangi kehilangan panas akibat penguapan air. Dalam sistem konversi energi, nilai kalor sering digunakan sebagai indikator kelayakan bahan bakar dalam menghasilkan energi listrik maupun energi termal. [34]

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Santos,2023) menunjukkan bahwa peningkatan kandungan karbon dan hidrogen akan meningkatkan nilai kalor, sedangkan kadar abu dan kelembaban tinggi menurunkan nilai kalor [13]. Menurut penelitian (Samsinar.,2014), terdapat beberapa standar mutu briket batu bara, dimana dapat dilihat pada tabel berikut [35].

Tabel 2. 2 Nilai Standar Mutu Briket Batu Bara

Sifat-sifat	Standar Mutu Batu Bara					
	Komersil	Impor	Jepang	Inggris	USA	SNI
Kadar Air (%)	7-8	6-8	6-8	3-4	6	8
Kadar Abu (%)	5,26	5-6	5-7	8-10	16	8-10

Kerapatan (g/cm ³)	0,4	0,53	1,0-1,2	0,46-0,84	1,0-1,2	0,5-0,6
Kuat Tekan (Kg/cm ²)	50	46	60	12,7	62	50
Nilai Kalor (kal/g)	6000	4700-5000	5000-6000	5870	4000-6500	5600

Menurut SNI Briket Batu Bara Klasifikasi berdasarkan nilai kalor dan ketebalan tipe briket dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. 3 Klasifikasi Briket Batu Bara Merujuk SNI

Kelas	Nilai Kalor (kal/g adb)		Ukuran Ketebalan (mm)		
	Briket batu bara terkarbonisasi	Briket Batubara tanpa-karbonisasi dan bio-batubara	Sarang tawon	Bantal/telur	Kenari
A	➤ 6000	5000-6000	≥ 125	≥ 49	≥ 26
B	4500-6000	4000-5000			

2.2.6 Konversi Energi Termal Pada Sistem *Waste to Energy* (WtE)

Waste to Energy (WtE) adalah konsep pemanfaatan sampah sebagai sumber energi alternatif melalui proses konversi termal maupun biologis. Teknologi yang umum digunakan dalam WtE antara lain:

1. Insinerasi:

Metode *incineration* atau pembakaran langsung merupakan salah satu teknologi yang paling banyak digunakan dalam proses konversi sampah menjadi energi listrik. Teknologi ini beroperasi dengan cara membakar limbah pada temperatur tinggi, umumnya melebihi 850°C, sehingga menghasilkan energi

panas. Panas yang terbentuk selanjutnya dimanfaatkan untuk menghasilkan uap dalam sistem pembangkit listrik tenaga uap. Uap bertekanan tinggi tersebut digunakan untuk memutar turbin yang kemudian menggerakkan generator dalam menghasilkan energi listrik.

Salah satu keunggulan utama teknologi incineration adalah kemampuannya dalam mengurangi volume sampah secara signifikan, bahkan dapat mencapai sekitar 90%. Pengurangan volume tersebut berperan penting dalam menekan akumulasi limbah di tempat pembuangan akhir (TPA) serta meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah perkotaan. Meskipun demikian, penerapan metode ini masih menghadapi tantangan lingkungan, terutama terkait potensi pelepasan gas rumah kaca dan polutan berbahaya seperti dioksin serta residu abu hasil pembakaran. [36]

2. Pirolisis:

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal bahan organik yang berlangsung pada temperatur tinggi dengan kondisi oksigen yang sangat terbatas atau bahkan tanpa kehadiran oksigen. Proses ini mampu mengubah material organik menjadi beberapa fraksi produk, yaitu gas, cairan, dan residu padat. Pirolisis banyak diterapkan dalam pengolahan berbagai jenis limbah organik, termasuk limbah plastik. Dalam pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan bakar alternatif, proses pirolisis berperan dalam memecah rantai polimer plastik menjadi senyawa hidrokarbon dengan struktur yang lebih sederhana. Senyawa hasil pemecahan tersebut dapat dikonversi menjadi bahan bakar cair, gas bahan bakar, maupun residu padat yang masih memiliki nilai energi. Dengan demikian, teknologi pirolisis menjadi salah satu metode yang berpotensi mendukung pemanfaatan limbah plastik sebagai sumber energi sekaligus mengurangi dampak lingkungan akibat akumulasi limbah plastik. [37]

Teknologi pirolisis beroperasi dengan memanaskan sampah pada kondisi tanpa keberadaan oksigen dengan temperatur tinggi, umumnya sekitar 400°C, sehingga menghasilkan uap hasil dekomposisi termal. Uap yang terbentuk selanjutnya dialirkan menuju sistem kondensasi untuk diproses lebih lanjut melalui tahapan penyulingan. Pada tahap penyulingan pertama, uap hasil pirolisis

dikonversi menjadi bahan bakar cair yang memiliki karakteristik menyerupai solar. Sisa uap yang belum terkondensasi kemudian dialirkan ke tahap penyulingan kedua, di mana proses pemisahan lanjutan menghasilkan bahan bakar dengan sifat yang mendekati bensin. Kedua fraksi bahan bakar cair tersebut memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi, termasuk dalam pembangkitan energi listrik untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat. [38]

Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Herlia, et, al. 2022), dimana keunggulan teknologi pirolisis antara lain: [39]

- a. Minyak yang dihasilkan dari proses pirolisis umumnya memiliki kandungan air yang sangat rendah, sehingga mampu memberikan nilai kalor yang tinggi dan menghasilkan energi yang lebih optimal.
- b. Produk minyak hasil pirolisis juga memiliki kandungan oksigen yang relatif rendah, sehingga dapat mengurangi potensi terjadinya korosi pada peralatan maupun mesin yang menggunakan bahan bakar tersebut.
- c. Teknologi pirolisis termasuk metode pengolahan limbah yang relatif ramah lingkungan karena menghasilkan emisi yang lebih kecil dibandingkan metode konversi termal lainnya. Selain itu, proses ini memiliki tingkat fleksibilitas operasional yang tinggi sehingga dapat diterapkan pada berbagai kondisi lokasi dan waktu sesuai kebutuhan pemanfaatan energi.

3. Gasifikasi:

Gasifikasi merupakan suatu proses konversi energi yang mengubah bahan bakar berbasis karbon, baik dalam bentuk padat maupun cair, menjadi gas sintetis atau *syngas*. Gas yang dihasilkan memiliki kandungan energi yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar setelah melalui proses oksidasi parsial pada temperatur tinggi. Melalui proses ini, material bahan bakar padat diubah menjadi gas yang mudah terbakar dan mengandung komponen utama seperti karbon monoksida (CO), metana (CH₄), serta hidrogen (H₂).

Menurut (Raharjo, 2021) gasifikasi merupakan proses konversi termokimia yang mengubah bahan bakar padat menjadi gas sintesis melalui reaksi dengan oksigen terbatas. Gas sintesis yang dihasilkan umumnya terdiri dari

karbon monoksida, hidrogen, dan metana yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar pembangkit listrik [40]. (Raharjo, 2021) juga menjelaskan bahwa proses gasifikasi terdiri dari beberapa tahapan utama yaitu pengeringan, pirolisis, oksidasi, dan reduksi. Efisiensi gasifikasi sangat dipengaruhi oleh karakteristik bahan bakar seperti kadar air, ukuran partikel, serta kandungan karbon bahan bakar [40].

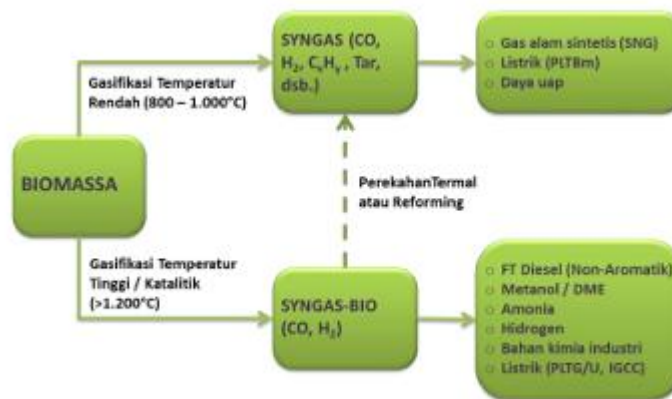
Proses gasifikasi berlangsung dengan suplai udara atau oksigen dalam jumlah terbatas, umumnya berkisar antara 20–40% dari kebutuhan oksigen dalam reaksi pembakaran stoikiometri. Kondisi oksigen terbatas tersebut memungkinkan terjadinya reaksi termokimia yang menghasilkan gas bahan bakar, bukan pembakaran sempurna. Dengan karakteristik tersebut, gasifikasi menjadi salah satu teknologi yang berpotensi meningkatkan efisiensi pemanfaatan bahan bakar sekaligus menghasilkan produk energi yang lebih fleksibel untuk berbagai aplikasi industri maupun pembangkitan listrik. [41]

Secara umum, proses gasifikasi terdiri atas empat tahapan utama. Tahap pertama adalah pengeringan (*drying*), yang berlangsung pada suhu di atas 150°C, di mana kandungan air dalam bahan bakar mulai menguap. Tahap kedua adalah pirolisis (*pyrolysis*), yang terjadi pada kisaran suhu 150–700°C dan ditandai dengan dekomposisi termal bahan organik menjadi gas volatil, tar, dan arang. Selanjutnya, tahap oksidasi (*oxidation*) berlangsung pada temperatur sekitar 700–1500°C, di mana sebagian bahan bakar bereaksi dengan oksigen untuk menghasilkan panas yang diperlukan dalam proses gasifikasi. Tahap terakhir adalah reduksi (*reduction*), yang terjadi pada suhu sekitar 800–1000°C dan menghasilkan gas sintesis yang kaya akan CO, H₂, dan CH₄ sebagai produk utama.

Dalam proses gasifikasi, tahapan pengeringan, pirolisis, dan reduksi merupakan reaksi yang bersifat endotermik, yaitu memerlukan suplai energi panas agar proses dapat berlangsung. Sebaliknya, tahap oksidasi merupakan reaksi eksotermik yang menghasilkan energi panas. Energi panas yang dilepaskan pada tahap oksidasi dimanfaatkan kembali untuk menunjang keberlangsungan proses pengeringan, pirolisis, dan reduksi sehingga sistem gasifikasi dapat berjalan secara berkesinambungan. Setelah melalui tahap pengeringan, bahan bakar yang

telah kehilangan sebagian besar kandungan air akan memasuki tahap pirolisis. Pada fase ini terjadi dekomposisi termal yang menghasilkan berbagai produk, termasuk uap, cairan organik, serta gas yang tidak dapat dikondensasikan, dengan menyisakan arang sebagai residu padat. Arang yang terbentuk kemudian mengalami reaksi lanjutan melalui proses pembakaran parsial dan reduksi. Pada tahap reduksi tersebut terbentuk gas sintetis yang didominasi oleh komponen utama berupa hidrogen (H_2) dan karbon monoksida (CO), yang memiliki potensi energi sebagai bahan bakar gas. [41]

Teknologi pembakaran modern mampu meningkatkan efisiensi energi sekaligus menurunkan emisi gas berbahaya melalui pengendalian temperatur pembakaran dan sistem pengolahan gas buang. Pengembangan teknologi pembakaran yang lebih efisien juga berkontribusi dalam mendukung pengelolaan sampah berkelanjutan serta pengurangan emisi karbon [42]. Menurut *International Energy Agency* pengembangan teknologi WtE memiliki dua keuntungan utama, yaitu mengurangi timbunan sampah di TPA sekaligus menyediakan energi alternatif yang lebih ramah lingkungan [43].



Gambar 2. 7 Produk gasifikasi biomassa dengan temperatur pemrosesan yang berbeda.