

Pengaruh Komposisi Campuran Biomassa dan Limbah Padat Perkotaan terhadap Karakteristik Pembakaran

Roswati Nurhasanah^{1*)}, Prayudi²⁾, Valencia Safir Maharani³⁾

^{1,2)}Program Studi S1 Teknik Mesin, Institut Teknologi PLN, Jakarta

³⁾Program Studi S1 Teknik Lingkungan, Institut Teknologi PLN, Jakarta

Email correspondence: roswati@itpln.ac.id¹⁾,

Abstract

Incineration is an important waste treatment technology for sustainable waste management. The use of biomass as an alternative fuel, either alone or mixed with Municipal Solid Waste (MSW), can improve combustion performance. This study investigates the combustion behavior of woodchips and MSW when used as single fuels and in mixed-fuel configurations under laboratory-scale conditions. Fuel characteristics were determined using proximate and ultimate analyses following ASTM standards. Combustion performance was evaluated based on temperature profiles, burning rate, and the formation of char and ash. The results show significant differences in combustion behavior between the tested fuels. Woodchips exhibited the most stable combustion performance, with a higher heating value of 4,134 kcal/kg, low ash content (0.91%), and peak temperatures reaching 1,095 °C. In contrast, MSW produced lower peak temperatures (913–992 °C), higher char yields (up to 3%), and greater ash formation. Mixing woodchips with MSW improved combustion performance. Among the tested mixtures, the 75:25 woodchips:MSW ratio provided the most balanced performance, achieving a peak temperature of 1,069.2 °C, char yields of 1.7–1.8%, and ash yields below 6.5%. Elemental analysis also showed that woodchips contained very low sulfur (0.06%) and nitrogen (0.05%), indicating lower potential for emission formation. Overall, the results suggest that a 75:25 woodchips:MSW mixture provides a practical balance between combustion stability, residue reduction, and emission potential for small-scale waste-to-energy applications.

Keywords : biomass, combustion characteristics, incineration, mixed fuel, municipal solid waste

1. PENDAHULUAN

Meningkatnya volume limbah padat perkotaan (MSW) yang dihasilkan secara global telah menjadi tantangan lingkungan dan kesehatan masyarakat yang serius, terutama di wilayah Asia dan Afrika yang mengalami urbanisasi pesat [1]. Produksi limbah padat perkotaan terus meningkat dengan laju yang mengkhawatirkan, dengan proyeksi menunjukkan peningkatan sebesar 70% pada tahun 2050 apabila tren saat ini terus berlanjut [2]. Sejumlah laporan global terbaru juga menekankan bahwa peningkatan timbulan limbah ini menuntut pendekatan pengelolaan yang tidak hanya berorientasi pada pengurangan volume limbah, tetapi juga pada pemanfaatan limbah sebagai sumber energi melalui

konsep *waste-to-energy* (WtE). Pengelolaan limbah yang efektif menghadapi berbagai hambatan, seperti keterbatasan ruang tempat pembuangan akhir, keterbatasan pendanaan, infrastruktur yang belum memadai, serta rendahnya partisipasi masyarakat [1]. Kondisi tersebut mendorong pengembangan teknologi konversi energi dari limbah yang mampu mengintegrasikan pengolahan limbah dengan produksi energi berkelanjutan. Permasalahan tersebut semakin terasa di negara berkembang, di mana sistem pengelolaan limbah sering kali tidak mampu mengikuti laju urbanisasi dan pertumbuhan penduduk yang sangat cepat.

Sistem pengelolaan limbah padat perkotaan di Indonesia saat ini berada pada

kondisi yang mengkhawatirkan dan berpotensi mengancam keselamatan masyarakat. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan melaporkan bahwa dari total timbulan sampah sebesar 33.541.026,18 ton per tahun, sekitar 59,82% telah dikelola dengan baik, sedangkan 40,18% lainnya masih belum tertangani secara memadai [3]. Pembuangan limbah yang tidak terkendali dapat menyebabkan kerusakan lingkungan yang serius, meningkatkan emisi gas rumah kaca, mencemari sumber air tanah, serta menimbulkan risiko terhadap kesehatan masyarakat. Selain itu, sektor pengelolaan limbah juga berkontribusi signifikan terhadap emisi metana yang memiliki potensi pemanasan global jauh lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida, sehingga pengolahan limbah melalui teknologi termal menjadi salah satu strategi mitigasi yang semakin banyak dikaji. Kondisi darurat sampah ini menuntut langkah penanganan yang segera, terutama karena Indonesia telah menetapkan target penurunan emisi gas rumah kaca sebesar 29% secara mandiri dan hingga 41% dengan dukungan internasional melalui Perjanjian Paris pada tahun 2030 [4].

Berbagai teknologi pengolahan termal saat ini mulai dikembangkan sebagai alternatif dalam pengelolaan limbah perkotaan, seperti insinerasi, gasifikasi, pirolisis, dan gasifikasi plasma [5], [6]. Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi *waste-to-energy* berbasis proses termal mendapatkan perhatian yang semakin besar karena mampu mengurangi volume limbah sekaligus menghasilkan energi panas maupun listrik yang dapat dimanfaatkan kembali. Proses insinerasi dipandang sebagai salah satu metode yang cukup efektif karena mampu mengurangi volume limbah hingga sekitar 90% serta menghasilkan residu yang relatif stabil sehingga dapat dimanfaatkan untuk penimbunan di tempat pembuangan akhir maupun aplikasi sekunder lainnya [5]. Dalam proses ini, material organik mengalami pembakaran melalui reaksi oksidasi pada temperatur tinggi yang menghasilkan gas, abu, dan energi panas.

Walaupun demikian, proses pembakaran MSW masih menghadapi sejumlah kendala operasional. Karakteristik umum MSW biasanya memiliki kandungan energi yang rendah, kadar air yang tinggi, serta komposisi material yang sangat beragam [7]. Kondisi tersebut dapat menyebabkan proses pembakaran menjadi tidak stabil, menghasilkan pembakaran yang tidak sempurna serta fluktuasi temperatur selama proses berlangsung. Oleh karena itu, diperlukan alternatif bahan bakar yang dapat meningkatkan efisiensi serta kestabilan proses pembakaran [8]. Salah satu pendekatan yang banyak diteliti dalam beberapa tahun terakhir adalah *co-combustion* atau pembakaran bersama antara limbah perkotaan dengan biomassa.

Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan, salah satunya dalam bentuk serpihan kayu (*woodchips*). Bahan ini dapat terbakar secara lebih efisien baik ketika digunakan secara terpisah maupun ketika dicampurkan dengan MSW [9]. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa sistem pembakaran yang memanfaatkan campuran *woodchips* dan MSW mampu meningkatkan parameter pembakaran sehingga menghasilkan kondisi pembakaran yang lebih stabil dan proses pengolahan limbah yang lebih baik [10]. Pendekatan pembakaran bersama biomassa dan MSW juga banyak dilaporkan mampu meningkatkan nilai kalor campuran bahan bakar, memperbaiki karakteristik pembakaran, serta meningkatkan efisiensi konversi energi pada sistem insinerasi. Pencampuran biomassa dengan MSW juga dapat membantu mengatasi sifat heterogen limbah yang sering menjadi tantangan dalam optimalisasi proses pembakaran [11]. Selain itu, biomassa berperan sebagai bahan bakar penyeimbang yang dapat membantu mempertahankan kestabilan temperatur ruang bakar selama proses berlangsung.

Perbedaan karakteristik pembakaran antara *woodchips*, residu pertanian, dan limbah organik sangat mempengaruhi kinerja insinerator ketika bahan bakar biomassa tersebut digunakan [12]. Komposisi bahan bakar berpengaruh terhadap temperatur pembakaran yang

dihasilkan, laju pembakaran, jenis residu yang terbentuk, serta kestabilan proses pembakaran [13], [14], [15]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa variasi rasio campuran biomassa dan MSW dapat secara signifikan mempengaruhi distribusi temperatur di dalam ruang bakar serta efisiensi degradasi material organik selama proses pembakaran. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan bahan bakar campuran dapat menghasilkan profil temperatur yang lebih baik serta mengurangi pembentukan residu [16], [17]. Desain insinerator yang tepat juga memungkinkan tercapainya temperatur pembakaran lebih dari 1.091°C sekaligus mempertahankan kestabilan proses pembakaran [8], [18]. Hal ini menunjukkan bahwa optimasi komposisi bahan bakar dan desain sistem pembakaran merupakan faktor penting dalam meningkatkan performa teknologi *waste-to-energy* berbasis insinerasi.

Walaupun berbagai penelitian telah dilakukan, masih terdapat sejumlah kesenjangan pengetahuan yang perlu dikaji lebih lanjut. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada kajian terpisah antara pembakaran biomassa dan insinerasi MSW. Penelitian komparatif yang membandingkan berbagai jenis biomassa dan kategori limbah dalam pengujian pembakaran masih relatif terbatas [9], [11]. Pengujian yang menganalisis rasio pencampuran bahan bakar dalam kondisi laboratorium terkontrol untuk mengevaluasi optimalisasi kinerja pembakaran pada skala kecil juga masih jarang dilakukan. Padahal, studi eksperimental pada skala laboratorium sangat penting untuk memahami mekanisme interaksi antara biomassa dan MSW selama proses pembakaran sebelum diterapkan pada skala industri. Banyak penelitian sebelumnya lebih menitikberatkan pada fasilitas industri berskala besar sehingga masih terdapat kekurangan pemahaman mengenai metode pencampuran bahan bakar yang optimal untuk meningkatkan efisiensi pembakaran.

Meskipun konsep pembakaran bersama biomassa telah banyak dibahas, data

eksperimen laboratorium yang membandingkan berbagai rasio campuran *woodchips* dan MSW pada insinerator skala kecil masih sangat terbatas, terutama terkait dengan indikator kinerja utama seperti temperatur maksimum, tingkat kesempurnaan pembakaran, dan pembentukan residu. Oleh karena itu, penelitian yang mengkaji pengaruh komposisi campuran bahan bakar terhadap karakteristik pembakaran pada insinerator skala laboratorium menjadi penting untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai strategi optimalisasi proses pembakaran biomassa dan MSW.

2. METODE PENELITIAN

Jenis Bahan Bakar Biomassa

- 1) *Woodchips*
- 2) Limbah Padat Perkotaan (MSW 100% Organik)
- 3) Komposisi Bahan Bakar Campuran



Gambar 1 (a) *Woodchips* (b) MSW

Kategori Limbah

- 1) Limbah plastik: bahan kemasan *polyethylene* (PE) dan *polypropylene* (PP), kantong plastik, serta wadah makanan.
- 2) Material organik basah (daun): daun segar maupun daun yang telah mengalami proses dekomposisi sebagian yang merepresentasikan limbah taman.
- 3) Limbah rumah tangga/kantin: limbah mudah terbakar yang terdiri dari sisa makanan, kertas, dan berbagai material organik lainnya.

Dalam penelitian ini, MSW digunakan sebagai jenis bahan bakar utama. Sementara

itu, limbah plastik, material organik basah (daun), serta limbah rumah tangga atau kantin merupakan komponen limbah yang dimasukkan ke dalam insinerator selama pengujian proses pembakaran.

Komposisi Bahan Bakar Campuran

Untuk mengetahui pengaruh pencampuran bahan bakar terhadap kinerja pembakaran, sampel bahan bakar campuran disiapkan dengan mengombinasikan *woodchips* dan MSW pada rasio massa [19] sebesar 25:75, 50:50, dan 75:25 (*woodchips*:MSW). Setiap campuran dihomogenkan secara menyeluruh untuk memastikan distribusi komponen yang merata pada seluruh sampel uji. Pemilihan rasio tersebut didasarkan pada studi pendahuluan serta pertimbangan praktis dalam operasional fasilitas pembakaran limbah, di mana proporsi biomassa yang ditambahkan dapat bervariasi sesuai dengan komposisi limbah lokal dan ketersediaan sumber biomassa [10].

Setiap variasi komposisi bahan bakar diuji sebanyak tiga kali pengulangan (triplicate experiments) untuk memastikan konsistensi hasil serta meminimalkan pengaruh variasi eksperimental terhadap parameter kinerja pembakaran yang diamati.

Karakterisasi Bahan Bakar

Karakterisasi bahan bakar dilakukan secara komprehensif dengan mengikuti standar ASTM yang umum digunakan dalam analisis biomassa dan bahan bakar padat.

Analisis Proksimat

Analisis proksimat dilakukan untuk menentukan kadar air, kadar abu, zat

terbang (*volatile matter*), dan nilai kalor tinggi (*Higher Heating Value/HHV*) pada kondisi *as-received* basis (ARB). Pendekatan ini memastikan bahwa kondisi bahan bakar yang dianalisis sesuai dengan kondisi aktual saat bahan bakar diperoleh di lapangan, sehingga data yang dihasilkan lebih relevan untuk sistem pembakaran limbah operasional.

Standar ASTM yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Kadar air: ASTM D3173-11 [19]
- Kadar abu: ASTM D3174-12 [20]
- Zat terbang: ASTM D3175-11 [19]
- Nilai kalor tinggi: ASTM D5865-13 [21]

Analisis Ultimat

Analisis ultimat dilakukan untuk menentukan komposisi unsur utama bahan bakar yang meliputi karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S) dengan menggunakan standar ASTM berikut:

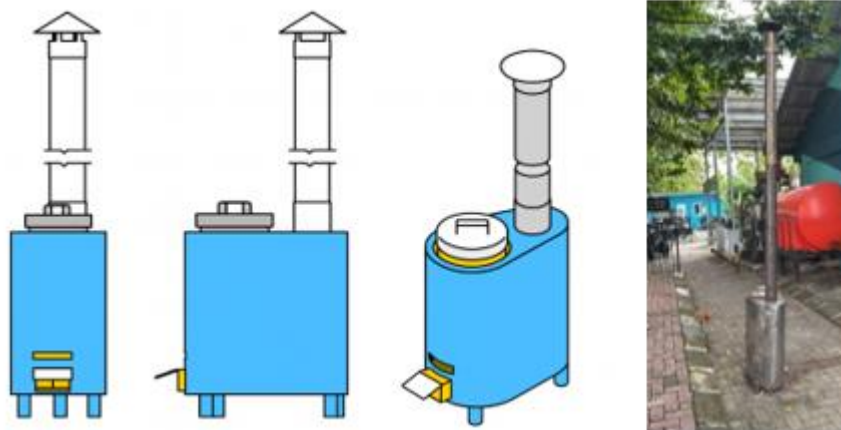
- Karbon, hidrogen, dan nitrogen: ASTM D5373-21 [22]
- Kadar sulfur: dilakukan sesuai prosedur karakterisasi bahan bakar yang berlaku.

Kandungan oksigen dihitung menggunakan metode selisih:

$$O\% = 100\% - (C\% + H\% + N\% + S\% + Ash\%)$$

Pengujian Insinerasi

Pengujian dilakukan menggunakan prototipe insinerator skala laboratorium seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Insinerator

Pengujian pembakaran skala laboratorium dilakukan menggunakan ruang bakar standar dengan suplai udara yang terkontrol serta sistem pemantauan temperatur. Desain insinerator dilengkapi dengan sistem *grate* pada bagian dasar yang berfungsi untuk menopang bahan bakar dan memungkinkan pengumpulan abu, serta menyediakan distribusi udara yang memadai agar pembakaran berlangsung secara sempurna [23].

Setiap pengujian menggunakan 10.000 g sampel bahan dengan kondisi operasi yang konsisten. Ruang bakar memiliki diameter silinder 24 cm dan tinggi 50 cm. Reaktor insinerator yang digunakan merupakan reaktor pembakaran tipe *fixed-bed* dengan konfigurasi silinder vertikal yang dilengkapi dengan sistem *grate* statis pada bagian dasar untuk mendukung distribusi udara primer dari bawah ruang bakar. Reaktor ini dirancang untuk operasi pembakaran biomassa dan limbah padat pada skala laboratorium dengan kapasitas bahan bakar hingga ± 10 kg per siklus pengujian.

Ruang pembakaran dibangun menggunakan batu tahan api refraktori SK34 yang mampu menahan temperatur di atas 1000°C , sehingga menjamin ketahanan struktur serta ketahanan termal selama operasi pada temperatur tinggi. Batu

tersebut direkatkan menggunakan mortar berbasis tanah liat tahan temperatur tinggi (C17 dan SK34) untuk memberikan kekuatan mekanis dan menjaga kedekatan termal ruang bakar. Lapisan refraktori tambahan juga diterapkan untuk meningkatkan ketahanan termal sekaligus melindungi permukaan bagian dalam ruang pembakaran.

Isolasi termal diperkuat dengan menambahkan vermiculite, yaitu material isolasi ringan yang tahan terhadap temperatur tinggi, untuk mengurangi kehilangan panas serta menjaga stabilitas temperatur selama proses pembakaran.

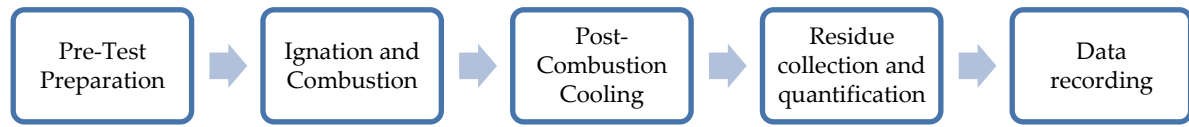
Komponen struktur dan logam dibuat dari stainless steel agar memiliki ketahanan terhadap kondisi temperatur tinggi dan lingkungan korosif. *Stainless steel grade 316* dengan ketebalan 1 mm dan 5 mm digunakan pada komponen yang terpapar temperatur tinggi serta elemen struktur penopang beban. *Stainless steel grade 304* dengan ketebalan 1 mm digunakan pada komponen eksternal yang memerlukan ketahanan terhadap korosi dan gas buang. Batang *stainless steel* berdiameter 10 mm digunakan sebagai elemen penguat dan pengikat dalam rangka insinerator.

Sistem suplai udara pada reaktor dikontrol menggunakan *blower* yang menyediakan aliran udara primer dari

bagian bawah ruang bakar dengan laju aliran udara operasi sekitar 0,02–0,04 m³/s untuk mempertahankan kondisi pembakaran yang stabil. Udara pembakaran dialirkan melalui *grate* sehingga terjadi kontak langsung antara oksigen dan bahan

bakar padat selama proses pembakaran berlangsung.

Pengujian pembakaran dilakukan mengikuti prosedur standar yang konsisten.



Gambar 3 Prosedur Eksperimen

Selama pengujian berlangsung, waktu tinggal gas (*gas residence time*) di dalam ruang pembakaran diperkirakan berada pada kisaran 1–2 detik berdasarkan volume ruang bakar dan laju aliran udara operasi, sehingga memungkinkan terjadinya oksidasi gas hasil pembakaran secara lebih optimal.

Kinerja Pembakaran

Parameter yang diukur meliputi temperatur pembakaran maksimum (°C), waktu pembakaran (menit), berat residu abu (g), dan berat residu arang (g). Untuk menilai kinerja insinerator dilakukan evaluasi terhadap parameter berikut [24].

- 1) *Burning rate* (g/minute)

$$B_{bt} = \frac{m(g)}{t(\text{minute})} \quad (1)$$

Bbt = *waste combustion rate* (g/min)

m = *mass of waste being burned* (g)

t = *combustion process time* (minutes)

- 2) *Char yield* (%):

$$\text{Char yield (\%)} = \frac{\text{Char weight}}{\text{Initial weight}} \times 100 \quad (2)$$

- 3) *Ash yield* (%):

$$\text{Ash yield (\%)} = (\text{Ash weight})/(\text{Initial weight}) \times 100\% \quad (3)$$

- 4) *Incinerator efficiency* (%) = 100% - (A%+B%) (4)

A : *Char yield* (%)

B : *Ash yield* (%)

Setelah setiap pengujian selesai, residu char dan abu dikumpulkan dengan hati hati, kemudian ditimbang dan dianalisis. Char merupakan material karbon yang tidak terbakar secara sempurna, sedangkan abu merupakan residu mineral anorganik yang tersisa setelah proses pembakaran. Neraca massa residu tersebut, bersama dengan massa awal bahan bakar, digunakan untuk menghitung efisiensi pembakaran. Parameter ini menjadi indikator penting untuk menilai tingkat kesempurnaan proses oksidasi serta efektivitas pengurangan volume limbah.

Penilaian Potensi Pembentukan Emisi

Potensi pembentukan emisi diperkirakan berdasarkan komposisi unsur bahan bakar, dengan mempertimbangkan bahwa emisi aktual dipengaruhi oleh berbagai parameter pembakaran [25].

Potensi pembentukan SO₂ diperkirakan dari kandungan sulfur dalam bahan bakar dengan asumsi bahwa seluruh sulfur secara teoritis dapat terkonversi menjadi SO₂ selama proses pembakaran.

Potensi pembentukan NO_x diperkirakan dari kandungan nitrogen dalam bahan bakar, mengingat nitrogen yang terikat dalam bahan bakar dapat terkonversi menjadi NO_x melalui mekanisme fuel-NO selama proses pembakaran [26]. Tingkat konversi aktual dipengaruhi oleh temperatur pembakaran, ketersediaan oksigen, waktu tinggal gas, serta kondisi pencampuran gas [26].

Kandungan nitrogen bahan bakar yang lebih tinggi menunjukkan potensi pembentukan NO_x yang lebih besar. Estimasi ini digunakan sebagai indikator perbandingan potensi pembentukan emisi antar berbagai konfigurasi bahan bakar, bukan sebagai prediksi langsung terhadap tingkat emisi yang sebenarnya [25].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja pembakaran dievaluasi dengan memvariasikan komponen limbah yang dimasukkan ke dalam insinerator,

sementara jenis bahan bakar yang dipilih (*woodchips*, MSW, atau bahan bakar campuran) tetap dipertahankan sebagai media pembakaran utama.

Karakterisasi Bahan Bakar

Tabel 1 menyajikan hasil pengujian proksimat dan ultimat dari biomassa *woodchips* dan MSW yang memiliki karakteristik kualitas bahan bakar berbeda serta berpotensi mempengaruhi kinerja pembakaran.

Tabel 1 Analisis Proksimat dan Ultimat Bahan Bakar Biomassa

<i>Parameter</i>	<i>Woodchips</i>	<i>MSW</i>
Proximate Analysis		
Moisture Content (%)	12.39	13.39
Ash Content (wt%)	0.91	11.61
HHV (kcal/kg)	4,134	3,748.69
Volatile Matter (wt%)	72.19	61.41
Ultimate Analysis		
Sulfur (wt%)	0.06	0.09
Carbon (wt%)	44.24	38.40
Hydrogen (wt%)	5.07	4.30
Nitrogen (wt%)	0.05	1.28
Oxygen (wt%)	37.28	30.39

Hasil karakterisasi bahan bakar yang ditunjukkan pada Tabel 1 memperlihatkan perbedaan kuantitatif yang jelas dan konsisten antara *woodchips* dan MSW yang secara langsung mempengaruhi perilaku pembakaran. *Woodchips* memiliki nilai kalor sebesar 4.134 kcal/kg, sekitar 10% lebih tinggi dibandingkan MSW. Perbedaan ini sejalan dengan kandungan karbon tetap pada *woodchips* yang lebih tinggi, yaitu 44,24% dibandingkan 38,40% pada MSW, serta kandungan abu yang jauh lebih rendah, yaitu 0,91% dibandingkan 11,61% pada MSW. Dalam perspektif pembakaran, fraksi abu yang lebih rendah pada *woodchips* mengurangi akumulasi material *inert* di dalam lapisan bahan bakar, sehingga mendukung konversi karbon yang lebih efektif dan kondisi pembakaran yang

lebih stabil. Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian pembakaran biomassa dan limbah padat perkotaan yang melaporkan bahwa bahan bakar dengan kandungan abu rendah dan nilai kalor lebih tinggi cenderung menghasilkan temperatur pembakaran yang lebih stabil serta efisiensi termal yang lebih baik [27], [28].

Kandungan zat terbang juga menjadi faktor pembeda utama antara kedua bahan bakar tersebut. *Woodchips* memiliki kandungan zat terbang yang lebih tinggi yaitu 72,19%, sedangkan MSW sebesar 61,41%. Kondisi ini mendukung proses penyalaan yang lebih cepat serta perkembangan nyala api yang lebih merata. Sebaliknya, fraksi zat terbang yang lebih rendah pada MSW berkaitan dengan proses

penyalaan yang lebih lambat serta perilaku pembakaran yang kurang konsisten. Kandungan air pada kedua bahan bakar berada pada kisaran yang relatif serupa, yaitu 12,39% untuk *woodchips* dan 13,39% untuk MSW. Meskipun perbedaannya tidak terlalu besar, kadar air yang sedikit lebih tinggi pada MSW meningkatkan kebutuhan energi awal untuk proses penguapan, sehingga mengurangi panas bersih yang tersedia pada tahap awal pembakaran. Kecenderungan ini juga sesuai dengan hasil penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa kandungan *volatile matter* yang tinggi mempercepat devolatilisasi dan penyalaan awal, sedangkan kadar air yang lebih tinggi menunda pencapaian temperatur puncak karena sebagian energi awal digunakan untuk evaporasi [29], [30].

Produksi abu menjadi salah satu keterbatasan operasional utama dalam pembakaran MSW. MSW menghasilkan kandungan abu lebih dari sepuluh kali lipat dibandingkan *woodchips*, yang menyebabkan akumulasi residu lebih tinggi serta meningkatkan kebutuhan sistem penanganan dan pembuangan abu. Fraksi abu yang tinggi ini juga berkontribusi terhadap penurunan efisiensi insinerator. Sebaliknya, kandungan abu yang sangat rendah pada *woodchips* mendukung proses oksidasi yang berkelanjutan serta operasi insinerator yang lebih stabil. Hasil ini konsisten dengan laporan pada studi-studi insinerasi dan *co-combustion* terbaru yang menegaskan bahwa tingginya kandungan abu pada fraksi limbah perkotaan berasosiasi dengan peningkatan residu padat, gangguan perpindahan panas, dan penurunan performa pembakaran dibandingkan biomassa lignoselulosa seperti *woodchips* [28], [31].

Analisis komposisi unsur juga memperkuat temuan tersebut. Kedua bahan bakar memiliki kandungan sulfur yang rendah, yaitu 0,06% pada *woodchips* dan 0,09% pada MSW, sehingga menunjukkan potensi pembentukan SO_2 yang relatif kecil.

Namun, kandungan nitrogen menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan. MSW memiliki kandungan nitrogen sebesar 1,28%, sedangkan *woodchips* hanya 0,05%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa MSW memiliki potensi yang jauh lebih besar dalam menghasilkan NO_x yang berasal dari nitrogen bahan bakar selama proses pembakaran. Perbedaan tersebut juga dilaporkan pada penelitian lain, di mana fraksi MSW atau bahan bakar turunan limbah dengan kandungan nitrogen lebih tinggi menunjukkan kecenderungan potensi pembentukan emisi NO_x yang lebih besar dibandingkan biomassa kayu [30], [32].

Secara keseluruhan, tren kuantitatif yang terlihat pada nilai kalor, kandungan zat terbang, kandungan abu, serta komposisi unsur menunjukkan bahwa *woodchips* memiliki karakteristik pembakaran yang lebih menguntungkan dibandingkan MSW. Kondisi ini menjelaskan stabilitas pembakaran yang lebih baik pada campuran bahan bakar yang kaya biomassa serta mendukung penggunaan *woodchips* sebagai bahan bakar pendamping untuk meningkatkan kinerja insinerasi MSW sekaligus mempertahankan kapasitas pengolahan limbah. Dengan demikian, hasil karakterisasi pada penelitian ini berada pada arah yang sama dengan *state of the art* pembakaran campuran biomassa-MSW, yaitu bahwa penambahan biomassa kayu berperan sebagai komponen penstabil yang memperbaiki kualitas termal bahan bakar campuran [27], [28], [31].

Eksperimen Pembakaran Bahan Bakar Tunggal

Tabel 2 menyajikan data kinerja insinerator dengan menggunakan bahan bakar biomassa *woodchips* dan MSW.

Tabel 2 Data Kinerja Insinerasi

<i>Parameter</i>	<i>Woodchips</i>			<i>MSW</i>		
	<i>Plastic</i>	<i>Organic wet materials (leaves)</i>	<i>Household/ canteen waste</i>	<i>Plastic</i>	<i>Organic wet materials (leaves)</i>	<i>Household/ canteen waste</i>
<i>Initial Waste Weight (g)</i>	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
<i>Maximum Temperature (°C)</i>	1,095	1,014	1,007	992	919	913
<i>Burning Time (minutes)</i>	3.9	16.0	21.0	4.3	17.5	23.0
<i>Ash Weight (g)</i>	26.5	137.0	164.2	338.0	1,747.0	2,094.9
<i>Char Weight (g)</i>	65.1	182.3	270.6	71.6	201.1	298.3
<i>Burning Rate (g/min)</i>	2,564.1	625.0	476.2	2,325.6	571.4	434.8
<i>Charl Yield (%)</i>	0.65	1.82	2.71	0.72	2.01	2.98
<i>Ash Yield (%)</i>	0.27	1.37	1.64	3.38	17.47	20.95
<i>Incinerator Efficiency (%)</i>	99.08	96.81	95.65	95.90	80.52	76.07

Tabel 2 merangkum kinerja pembakaran *woodchips* dan MSW untuk tiga komponen limbah yang mewakili, yaitu limbah plastik, material organik basah (daun), serta limbah rumah tangga atau kantin. Seluruh pengujian dilakukan pada kondisi operasi yang sama dengan massa limbah awal sebesar 10.000 g, sehingga memungkinkan perbandingan langsung terhadap perilaku pembakaran berdasarkan jenis bahan bakar dan komposisi limbah.

Kecenderungan temperatur yang lebih tinggi dan laju pembakaran yang lebih cepat pada biomassa kayu ini sejalan dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa *woodchips* atau biomassa kayu memiliki perilaku pembakaran yang lebih reaktif dibandingkan fraksi MSW mentah karena kandungan abu yang lebih rendah dan karakter bahan bakar yang lebih homogen [27], [29].

Pembentukan residu pada pembakaran *woodchips* sangat rendah. Persentase abu berada di bawah 2% untuk seluruh komponen limbah, sedangkan *char yield* berada pada kisaran 0,65% hingga 2,71%. Kondisi ini menghasilkan nilai efisiensi insinerator yang tinggi secara konsisten, yaitu antara 95,65% hingga 99,08%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *woodchips* mendukung proses penyalaan yang cepat, oksidasi yang berkelanjutan, serta konversi material mudah terbakar yang efektif pada kondisi insinerasi skala laboratorium. Hasil ini mendukung temuan pada studi lain bahwa biomassa kayu cenderung menghasilkan residu abu dan *char* yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar limbah padat campuran, sehingga lebih mudah mempertahankan pembakaran lengkap pada reaktor fixed-bed skala kecil [28], [31].

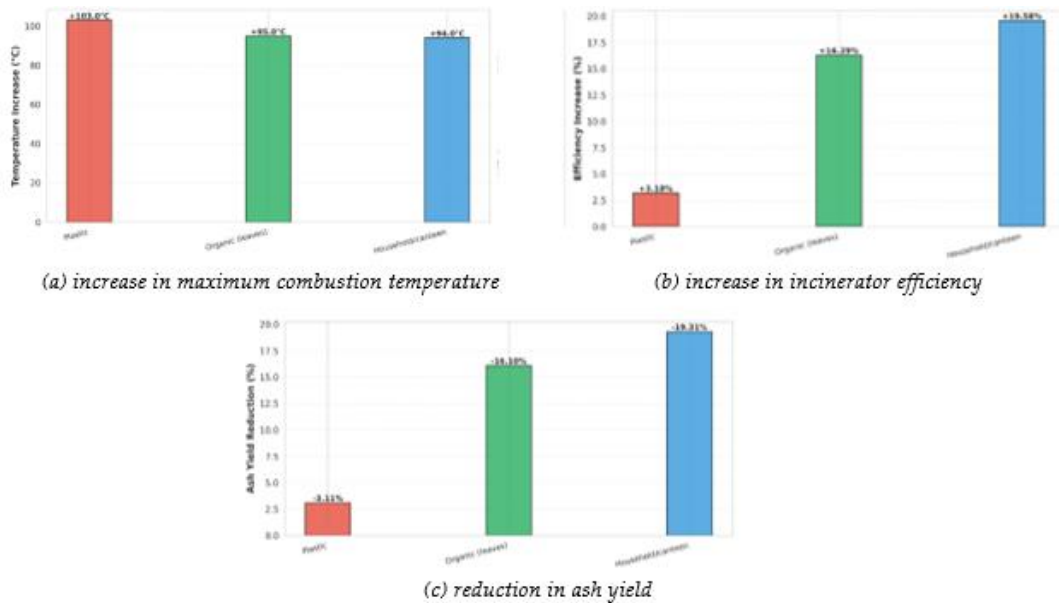
Sebaliknya, MSW murni menunjukkan kinerja pembakaran yang lebih rendah dan

lebih bervariasi. Temperatur maksimum berada pada kisaran 913°C hingga 992°C, sekitar 10–15% lebih rendah dibandingkan temperatur yang dihasilkan oleh *woodchips*. Laju pembakaran juga lebih rendah, yang mencerminkan pelepasan panas yang lebih lambat serta perilaku pembakaran yang kurang stabil. Pembentukan residu pada MSW jauh lebih tinggi. Persentase abu meningkat tajam dari 3,38% pada limbah plastik hingga lebih dari 20% pada limbah rumah tangga atau kantin, yang menunjukkan akumulasi material tidak terbakar yang cukup besar. *Char yield* juga lebih tinggi dibandingkan *woodchips*, sehingga menghasilkan nilai efisiensi insinerator yang lebih rendah, yaitu antara 76,07% hingga 95,90%. Tren ini menunjukkan keterbatasan operasional dalam pembakaran MSW secara langsung, terutama terkait dengan penanganan residu dan konversi karbon yang tidak sempurna. Perilaku ini juga telah dilaporkan dalam penelitian insinerasi MSW lainnya, di mana heterogenitas komposisi limbah, kandungan air, dan fraksi anorganik yang lebih tinggi menyebabkan temperatur puncak lebih rendah, pembentukan residu lebih besar, dan efisiensi pembakaran yang lebih fluktuatif [30], [32].

Pada kedua jenis bahan bakar tersebut, komposisi limbah memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap perilaku pembakaran. Limbah plastik secara konsisten menghasilkan temperatur maksimum tertinggi serta laju pembakaran tercepat, yang berkaitan dengan kepadatan energi yang tinggi serta sifatnya yang mudah menguap. Material organik basah membutuhkan waktu pembakaran yang lebih lama, yaitu sekitar 16,0 hingga 17,5 menit, karena kandungan air yang lebih

tinggi sehingga memerlukan energi tambahan untuk proses penguapan sebelum penyalaan terjadi. Limbah rumah tangga atau kantin menunjukkan durasi pembakaran terpanjang, yaitu sekitar 21,0 hingga 23,0 menit, serta menghasilkan abu paling tinggi. Kondisi ini berkaitan dengan komposisi limbah yang heterogen serta kandungan material tidak terbakar yang lebih besar. Kecenderungan ini konsisten dengan laporan eksperimen pembakaran limbah campuran yang menunjukkan bahwa fraksi plastik berkontribusi pada pelepasan panas cepat, sedangkan fraksi organik basah dan limbah rumah tangga yang lebih heterogen cenderung memperpanjang waktu pembakaran dan meningkatkan pembentukan residu [28], [30].

Secara keseluruhan, tren kuantitatif pada Tabel 2 menunjukkan bahwa *woodchips* memiliki karakteristik pembakaran yang lebih baik dibandingkan MSW pada seluruh komponen limbah, yang ditunjukkan oleh temperatur pembakaran yang lebih tinggi, laju pembakaran yang lebih cepat, serta pembentukan residu yang jauh lebih rendah. Tren ini menjelaskan stabilitas pembakaran yang lebih baik pada bahan bakar biomassa serta memberikan dasar yang jelas untuk pemanfaatannya sebagai komponen penstabil dalam sistem insinerasi bahan bakar campuran. Secara umum, hasil ini memperkuat temuan penelitian terdahulu bahwa biomassa kayu dapat berfungsi sebagai bahan bakar pendamping yang efektif untuk meningkatkan performa termal sistem pembakaran limbah padat perkotaan [27], [31].



Gambar 4 Analisis peningkatan kinerja yang membandingkan MSW 100% dan *woodchips* 100%

Gambar 4 memperkuat hasil numerik pada Tabel 2 dan memperlihatkan dengan lebih jelas perbedaan kinerja antara MSW dan *woodchips*. Pada Gambar 4(a) terlihat bahwa penggunaan *woodchips* secara konsisten meningkatkan temperatur pembakaran maksimum untuk seluruh jenis limbah. Hal ini juga terlihat pada Tabel 2, di mana temperatur pembakaran mencapai 1.095°C untuk limbah plastik, 1.014°C untuk material organik basah, dan 1.007°C untuk limbah rumah tangga, yang semuanya lebih tinggi dibandingkan temperatur yang dihasilkan oleh MSW. Temperatur yang lebih tinggi ini menunjukkan kualitas bahan bakar *woodchips* yang lebih baik, terutama karena nilai kalor yang lebih tinggi serta kandungan abu yang jauh lebih rendah sehingga mendukung proses pembakaran yang lebih stabil dan intensif. Hasil tersebut berada dalam kisaran yang sebanding dengan beberapa studi pembakaran biomassa pada insinerator atau *combustor* skala kecil yang melaporkan bahwa temperatur operasi dapat mendekati atau melampaui 1.000°C ketika bahan bakar memiliki kualitas termal yang baik dan suplai udara memadai [27], [29].

Tren yang sama juga terlihat pada efisiensi insinerator seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4(b). Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa efisiensi pembakaran dengan *woodchips* tetap tinggi pada seluruh kondisi pengujian, sedangkan MSW menunjukkan hasil yang lebih rendah dan lebih bervariasi. Peningkatan efisiensi terbesar terjadi pada material organik basah dan limbah rumah tangga, yang menunjukkan bahwa *woodchips* mampu menangani bahan bakar yang lembap dan heterogen dengan lebih efektif. Pada saat yang sama, Gambar 4(c) menunjukkan penurunan pembentukan abu secara signifikan ketika *woodchips* digunakan, sejalan dengan nilai ash yield yang rendah pada Tabel 2. Kecenderungan penurunan residu ini juga sesuai dengan penelitian lain yang melaporkan bahwa biomassa kayu memberikan kontribusi positif terhadap kestabilan pembakaran dan mengurangi akumulasi abu dibandingkan pembakaran limbah perkotaan tanpa penambahan biomassa [28], [31].

Secara keseluruhan, ketiga indikator pada Gambar 4 menunjukkan hubungan sebab akibat yang jelas. Temperatur pembakaran yang lebih tinggi menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi

serta produksi abu yang lebih rendah. Pada kondisi pengujian yang dilakukan, kombinasi tersebut menghasilkan proses pembakaran yang lebih lengkap, stabil, dan andal ketika *woodchips* digunakan dibandingkan dengan MSW murni. Interpretasi ini sejalan dengan pemahaman umum pada literatur pembakaran termal bahwa peningkatan kualitas bahan bakar

akan memperbaiki pelepasan panas, menyempurnakan oksidasi, dan pada akhirnya menurunkan fraksi residu padat yang tertinggal setelah pembakaran [27], [30].

Eksperimen Pembakaran Bahan Bakar Campuran

Tabel 3 Data Kinerja Bahan Bakar Campuran *Woodchips* dan MSW

<i>Composition</i>	<i>Parameter</i>	<i>Plastic</i>	<i>Organic wet materials (leaves)</i>	<i>Household/canteen waste</i>
25:75	Maximum Temperature (°C)	1,017.8	942.8	936.5
	Incinerator Efficiency (%)	97.07	84.97	81.34
	Ash Yield (%)	2.60	13.44	16.12
50:50	Maximum Temperature (°C)	1,043.5	966.5	960.0
	Incinerator Efficiency (%)	97.99	89.16	86.36
	Ash Yield (%)	1.82	9.42	11.30
75:25	Maximum Temperature (°C)	1,069.2	990.2	983.5
	Incinerator Efficiency (%)	98.66	93.11	91.13
	Ash Yield (%)	1.05	5.40	6.47

Tabel 3 merangkum kinerja pembakaran bahan bakar campuran *woodchips* dan MSW pada tiga rasio pencampuran yaitu 25:75, 50:50, dan 75:25 untuk limbah plastik, material organik basah, serta limbah rumah tangga atau kantin. Hasil pengujian menunjukkan adanya peningkatan kinerja pembakaran yang konsisten seiring dengan bertambahnya proporsi *woodchips* pada seluruh komponen limbah. Kecenderungan peningkatan performa seiring naiknya fraksi biomassa ini sejalan dengan berbagai studi co-combustion yang menunjukkan bahwa penambahan biomassa ke dalam bahan bakar limbah dapat meningkatkan kestabilan termal campuran dan menurunkan pembentukan residu [27], [31], [32].

Pada rasio 25:75 *woodchips*:MSW, kinerja pembakaran hanya menunjukkan peningkatan yang terbatas dibandingkan dengan MSW murni. Temperatur pembakaran maksimum berada pada kisaran 936,5 °C hingga 1.017,8 °C, sementara efisiensi insinerator masih relatif rendah pada limbah organik dan limbah rumah tangga yaitu sekitar 81,34% hingga 84,97%. Persentase abu juga masih cukup tinggi, khususnya pada aliran limbah organik dan limbah rumah tangga, yang dapat mencapai 16,12%. Kondisi ini menunjukkan bahwa akumulasi residu inert masih cukup besar dan proses konversi material mudah terbakar belum berlangsung secara optimal. Hasil ini sebanding dengan laporan penelitian lain yang menunjukkan bahwa pada campuran dengan dominasi MSW, pengaruh positif

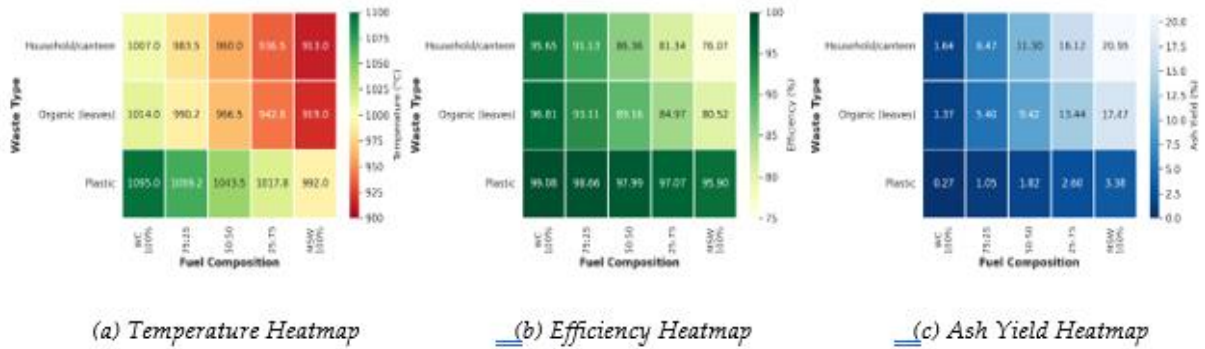
biomassa belum sepenuhnya mampu mengimbangi tingginya kandungan abu dan heterogenitas limbah, sehingga perbaikan temperatur dan efisiensi masih terbatas [30], [32].

Peningkatan fraksi *woodchips* hingga rasio 50:50 menghasilkan peningkatan kinerja pembakaran yang lebih jelas. Temperatur maksimum meningkat sekitar 25–30 °C pada seluruh jenis limbah, diikuti dengan peningkatan efisiensi insinerator yang berada pada kisaran 86,36% hingga 97,99%. Pada saat yang sama, persentase abu mengalami penurunan yang cukup signifikan menjadi sekitar 1,82% hingga 11,30%. Tren tersebut menunjukkan kondisi termal yang lebih baik serta proses oksidasi yang lebih efektif seiring meningkatnya kontribusi biomassa dalam campuran bahan bakar. Perbaikan bertahap pada rasio menengah ini juga banyak dilaporkan pada studi *co-firing/co-combustion*, di mana rasio campuran yang lebih seimbang menghasilkan sinergi antara kandungan energi biomassa dan kapasitas pengolahan limbah, sehingga pembakaran menjadi lebih stabil dibandingkan MSW murni [27], [31].

Perilaku pembakaran yang paling baik terlihat pada rasio 75:25 *woodchips*:MSW. Konfigurasi ini secara konsisten menghasilkan temperatur maksimum tertinggi, mencapai 1.069,2 °C untuk limbah plastik dan tetap berada di sekitar 1.000 °C untuk limbah organik serta limbah rumah tangga. Efisiensi insinerator juga melebihi 90% pada seluruh komponen limbah, sementara persentase abu mengalami penurunan yang cukup besar dan berada pada kisaran 1,05% hingga 6,47%. Jika dibandingkan dengan rasio

woodchips yang lebih rendah, konfigurasi ini menunjukkan penurunan pembentukan residu yang cukup signifikan dengan tetap mempertahankan karakteristik pembakaran yang stabil. Temuan ini selaras dengan penelitian lain yang menunjukkan bahwa peningkatan fraksi biomassa kayu hingga dominan dalam campuran umumnya menghasilkan temperatur lebih tinggi, residu lebih rendah, dan efisiensi pembakaran lebih baik karena sifat biomassa yang lebih homogen dan reaktif [28], [31].

Tren yang diamati menunjukkan bahwa peningkatan proporsi *woodchips* secara langsung mempengaruhi parameter utama pembakaran seperti temperatur, pembentukan residu, dan efisiensi insinerator. Kandungan *woodchips* yang lebih tinggi memberikan nilai kalor yang lebih besar, masukan abu yang lebih rendah, serta sifat bahan bakar yang lebih homogen. Kombinasi faktor tersebut mendukung proses oksidasi yang berkelanjutan serta meningkatkan kinerja operasi insinerator. Rasio 75:25 *woodchips*:MSW memberikan keseimbangan yang cukup baik antara peningkatan kinerja pembakaran dan pemanfaatan MSW secara efektif, dengan karakteristik pembakaran yang mendekati *woodchips* murni namun tetap mampu mengolah fraksi MSW dalam jumlah yang cukup besar. Secara konseptual, hasil ini mendukung temuan *state of the art* bahwa pencampuran biomassa dan MSW tidak hanya berfungsi sebagai strategi peningkatan energi bahan bakar, tetapi juga sebagai pendekatan optimasi operasional untuk mengurangi keterbatasan pembakaran MSW murni [27], [30], [32].



Gambar 5 Analisis heatmap kinerja pembakaran untuk berbagai komposisi bahan bakar *woodchips*:MSW

Pola kinerja pembakaran yang ditunjukkan pada Gambar 5 sejalan dengan data yang disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3. Berdasarkan Tabel 2, pembakaran menggunakan *woodchips* umumnya menghasilkan temperatur puncak yang lebih tinggi, efisiensi insinerator yang lebih baik, serta produksi abu yang lebih rendah dibandingkan MSW pada seluruh kategori limbah yang diuji. Sebaliknya, pembakaran MSW menunjukkan efisiensi yang lebih rendah dan pembentukan residu yang lebih tinggi, terutama pada material organik basah serta limbah rumah tangga atau kantin. Perbedaan tersebut memberikan dasar untuk menilai pengaruh pencampuran bahan bakar. Kecenderungan ini serupa dengan berbagai hasil eksperimen pembakaran campuran biomassa–limbah yang menunjukkan bahwa peningkatan kualitas termal campuran secara langsung tercermin pada kenaikan temperatur dan penurunan residu akhir [28], [31].

Hasil pengujian bahan bakar campuran pada Tabel 3 serta visualisasi pada Gambar 5(a) hingga 5(c) menunjukkan peningkatan kinerja pembakaran secara bertahap seiring bertambahnya proporsi *woodchips*. Temperatur pembakaran dan efisiensi insinerator meningkat secara konsisten dari campuran 25:75 hingga 75:25 *woodchips*–MSW, sementara produksi abu mengalami penurunan secara bersamaan. Pada rasio 75:25, temperatur pembakaran hampir mendekati kondisi yang diperoleh pada

penggunaan *woodchips* 100%, dan efisiensi insinerator telah melampaui 90% pada seluruh kategori limbah. Persentase abu juga jauh lebih rendah dibandingkan campuran yang didominasi oleh MSW. Setelah rasio tersebut, peningkatan kandungan *woodchips* memberikan perubahan yang relatif lebih kecil terhadap parameter kinerja yang diukur. Pola mendekatnya performa campuran terhadap *woodchips* murni pada fraksi biomassa tinggi juga telah dilaporkan dalam studi terdahulu, yang menunjukkan adanya titik rasio optimum di mana peningkatan performa mulai mengalami *diminishing return* meskipun kandungan biomassa terus ditambah [27], [31], [32].

Secara keseluruhan, hasil yang diperoleh dari Tabel 2, Tabel 3, dan Gambar 5 menunjukkan bahwa campuran *woodchips*–MSW pada rasio 75:25 memberikan keseimbangan yang cukup baik antara temperatur pembakaran, efisiensi insinerator, dan produksi abu dalam kerangka eksperimen yang digunakan. Meskipun penggunaan *woodchips* 100% menghasilkan kinerja terbaik secara keseluruhan, peningkatan yang diperoleh dibandingkan campuran 75:25 relatif kecil jika dibandingkan dengan penurunan kemampuan pengolahan MSW. Oleh karena itu, rasio 75:25 dapat dipertimbangkan sebagai kisaran operasi yang sesuai untuk meningkatkan kinerja pembakaran sekaligus mempertahankan

pemanfaatan MSW secara efektif pada sistem insinerasi skala kecil. Kesimpulan ini sejalan dengan arah penelitian pembakaran campuran biomassa–MSW saat ini, yaitu mencari rasio campuran yang tidak hanya memaksimalkan performa termal, tetapi juga tetap realistis dari sisi pemanfaatan limbah dan operasional sistem *waste-to-energy* skala kecil [27], [30], [31].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Woodchips menunjukkan kinerja pembakaran yang lebih baik dibandingkan MSW, dengan efisiensi insinerator yang dapat mencapai 99,08% karena memiliki nilai kalor yang lebih tinggi serta kandungan abu yang rendah. Pembakaran MSW secara langsung menghasilkan temperatur yang lebih rendah, residu abu dan char yang lebih tinggi, serta pembakaran yang kurang stabil, terutama pada limbah organik basah dan limbah rumah tangga. Limbah plastik menunjukkan laju pembakaran tercepat serta temperatur pembakaran tertinggi. Pembakaran bersama MSW dengan *Woodchips* secara konsisten meningkatkan kinerja pembakaran. Dari berbagai komposisi campuran yang diuji, rasio 75:25 *woodchips*–MSW memberikan hasil yang paling seimbang, dengan efisiensi di atas 90%, temperatur pembakaran yang mendekati kondisi *woodchips* murni, serta penurunan pembentukan abu yang signifikan sambil tetap mempertahankan pemanfaatan MSW secara efektif. Dari sisi praktis, temuan ini menunjukkan bahwa insinerator skala kecil dapat meningkatkan stabilitas operasi dan efisiensi dengan menambahkan biomassa dalam jumlah tertentu dibandingkan hanya menggunakan MSW murni. Rasio 75:25 *woodchips*–MSW dapat direkomendasikan sebagai pedoman operasional untuk sistem *waste-to-energy* skala kecil. Penelitian selanjutnya perlu diarahkan pada validasi skala yang lebih besar, optimalisasi suplai udara dan waktu tinggal untuk bahan bakar campuran,

serta pengukuran langsung emisi gas buang guna memastikan kinerja lingkungan dan operasional dalam jangka panjang.

Referensi

- [1] Z. Zhang *et al.*, “Municipal solid waste management challenges in developing regions: A comprehensive review and future perspectives for Asia and Africa,” Jun. 20, 2024, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.172794.
- [2] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, and Frank Van Woerden, “What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 . Washington, DC: World Bank, 2018.” doi: 10.1596/978-1-4648-1329-0.
- [3] “Ministry of Environment and Forestry Indonesia, ‘National Waste Management Information System (SIPSN),’ 2023. [Online]. Available: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/timbulan.”>
- [4] “Folu Net Sink: Ministry Of Environment And Forestry Indonesia’s Climate Actions Towards 2030.”
- [5] M. Syamsiro, P. Setyono, K. Hariyanti, and G. Sutanto, “Kajian Teknologi Alternatif Pengolahan Sampah Padat Perkotaan menjadi Energi Terbarukan Ramah Lingkungan,” *J-Proteksion: Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 19–30, Aug. 2024, doi: 10.32528/jp.v9i1.1757.
- [6] E. Y. I. Christanti, I. N. S. Kumara, and C. G. I. Partha, “Analisis Tekno-Ekonomi dari Refuse Derived Fuel (RDF) sebagai Waste To Energy (WTE) di TPA Pakusari Jember, Jawa Timur,” *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 21, no. 2, p. 201, Dec. 2022, doi: 10.24843/mite.2022.v21i02.p07.
- [7] Z. Feng, X. Zhuo, Z. Luo, and Q. Cheng, “Modeling Analysis and Research on the Evaporation System

- of a Multisource Organic Solid Waste Incinerator,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 23, Dec. 2023, doi: 10.3390/su152316375.
- [8] V. Antono, R. Nurhasanah, and A. S. N. Chairat, “Domestic Waste Incinerator Design with Bio-Mass Fuel,” *Advances in Science and Technology*, vol. 125, pp. 39–47, 2023, doi: 10.4028/p-25prt9.
- [9] A. V Bridgwater, “Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading,” *Biomass Bioenergy*, vol. 38, pp. 68–94, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>.
- [10] M. Rimár, O. Kulikova, A. Kulikov, and M. Fedak, “Energy Treatment of Solid Municipal Waste in Combination with Biomass by Decentralized Method with the Respect to the Negative Effects on the Environment,” *Sustainability*, vol. 13, no. 8, p. 4405, 2021, doi: 10.3390/SU13084405.
- [11] L. Lombardi, E. Carnevale, and A. Corti, “A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste,” *Waste Management*, vol. 37, pp. 26–44, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>.
- [12] “P. T. Williams, Waste treatment and disposal, John Wiley & Sons, 2005.,” in *Waste Treatment and Disposal*, John Wiley & Sons, Ltd, 2005, pp. 375–380. doi: <https://doi.org/10.1002/0470012668.index>.
- [13] S. Consonni, M. Giugliano, and M. Grosso, “Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste: Part A: Mass and energy balances,” *Waste Management*, vol. 25, no. 2, pp. 123–135, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.09.007>.
- [14] A. S. Al-Rahbi and P. T. Williams, “Waste ashes as catalysts for the pyrolysis–catalytic steam reforming of biomass for hydrogen-rich gas production,” *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 21, no. 5, pp. 1224–1231, Sep. 2019, doi: 10.1007/s10163-019-00876-8.
- [15] T. Malkow, “Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal,” *Waste Management*, vol. 24, no. 1, pp. 53–79, 2004, doi: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(03\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00038-2).
- [16] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass,” *Bioresour Technol*, vol. 83, no. 1, pp. 37–46, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3).
- [17] C. Ryu, Y. Bin Yang, A. Khor, N. E. Yates, V. N. Sharifi, and J. Swithenbank, “Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments - Fuel type, equivalence ratio and particle size,” *Fuel*, vol. 85, no. 7–8, pp. 1039–1046, May 2006, doi: 10.1016/j.fuel.2005.09.019.
- [18] D. L. Edy, E. Hendrik, A. Atif Fikri, and A. Basuki, “Hybrid Technology Incinerator For Solid Waste Processing Using an Evaporative Cooling System,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Jan. 2024. doi: 10.1051/e3sconf/202447304009.
- [19] “Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke,” Apr. 01, 2021, *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D3172-13R21E01.
- [20] “Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal,” Oct. 15, 2018, *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D3174-12R18E01.

- [21] “Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke,” Oct. 01, 2013, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/D5865-13.
- [22] “Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke,” Apr. 01, 2021, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/D5373-21.
- [23] C. Yin, L. A. Rosendahl, and S. K. Kær, “Grate-firing of biomass for heat and power production,” *Prog Energy Combust Sci*, vol. 34, no. 6, pp. 725–754, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.05.002>.
- [24] Junaidi, Eddy Kurniawan, and Abdika Lasmana, “Analisis Laju Aliran Udara dan Laju Aliran Massa Bahan Bakar Terhadap Beban Pembakaran Sampah pada Incinerator Berbahan Bakar Limbah Oli Bekas,” *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material e-ISSN: 2579-7433 Junaidi, Kurniawan, & Lasmana. Vol. 5, No. 1, 2021: 17-23, 2021*. doi : 10.30588/jeemm.v5i1.838
- [25] A. Williams, J. M. Jones, L. Ma, and M. Pourkashanian, “Pollutants from the combustion of solid biomass fuels,” Apr. 2012. doi: 10.1016/j.pecs.2011.10.001.
- [26] “Formation and control of nitrogen oxides,” *Catal Today*, vol. 2, no. 4, pp. 369–379, 1988, doi: [https://doi.org/10.1016/0920-5861\(88\)80002-6](https://doi.org/10.1016/0920-5861(88)80002-6).
- [27] C. Wei, Z. Yu, X. Zhang, and X. Ma, “Co-combustion behavior of municipal solid waste and food waste anaerobic digestates: Combustion performance, kinetics, optimization, and gaseous products,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 5, Art. no. 106028, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.106028.
- [28] H. Wu, L. Zhu, J. Cai, and H. Lv, “Effect of Sewage Sludge Addition on the Co-Combustion Characteristics of Municipal Solid Waste Incineration,” *Processes*, vol. 12, no. 10, Art. no. 2172, 2024, doi: 10.3390/pr12102172.
- [29] L. Bianchini, A. Colantoni, R. Venanzi, L. Cozzolino, and R. Picchio, “Physicochemical Properties of Forest Wood Biomass for Bioenergy Application: A Review,” *Forests*, vol. 16, no. 4, Art. no. 702, 2025, doi: 10.3390/f16040702.
- [30] D. Racero-Galaraga, J. D. Rhenals-Julio, S. Sofan-German, J. M. Mendoza, and A. Bula-Silvera, “Proximate analysis in biomass: Standards, applications and key characteristics,” *Results in Chemistry*, vol. 12, Art. no. 101886, 2024, doi: 10.1016/j.rechem.2024.101886.
- [31] I. Maj, K. Niesporek, P. Płaza, J. Maier, and P. Łój, “Biomass Ash: A Review of Chemical Compositions and Management Trends,” *Sustainability*, vol. 17, no. 11, Art. no. 4925, 2025, doi: 10.3390/su17114925.
- [32] G. J. Roeder, J. Haimerl, Y. Chen, M. Gaderer, S. Fendt, and H. Spliethoff, “Measurements of NO_x emissions from biomass combustion in small to large-scale power plants,” *Fuel*, vol. 385, Art. no. 135801, 2025, doi: 10.1016/j.fuel.2025.135801.