

Potensi *Refuse-Derived Fuel* (RDF) pada hasil pengolahan mesin cacah pilah/*Gibrik* TPS 3R di wilayah Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

Jauhar Salsabila, Hijrah Purnama Putra*, Fajri Mulya Iresha, Yebi Yuriandala

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55584

*Email: hijrah@uii.ac.id

Received 15 Agustus 2026; Received in revised 29 September 2026; Accepted 30 September 2026

Abstrak

Penutupan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Piyungan, Daerah Istimewa Yogyakarta, menimbulkan kendala pengelolaan sampah residu di Kabupaten Sleman. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi potensi sampah residu mesin cacah pilah (*gibrik*) sebagai bahan baku *Refuse-Derived Fuel* (RDF) berdasarkan komposisi, karakteristik proksimat, dan nilai kalor. Pengambilan sampel dilakukan selama tiga hari menggunakan metode *simple random sampling* pada tiga TPS 3R, yaitu Brama Muda, Randu Alas, dan Bening. Analisis komposisi mengacu pada SNI 19-3964-1994, sedangkan pengujian proksimat dan nilai kalor menggunakan metode ASTM. Kesesuaian mutu dievaluasi berdasarkan SNI 8966:2021 dan standar RDF beberapa negara sebagai pembanding. Hasil menunjukkan bahwa residu didominasi plastik (91,14%), dengan kadar air 0,53–1,74%, kadar abu 6,19–10,04%, kadar volatil 88,00–93,00%, dan karbon tetap 0,29–0,70%. Nilai kalor mencapai 28,63–29,61 MJ/kg (6.843,31–7.076,05 kkal/kg), setara sekitar 1,29 ton batubara per ton residu. Kadar air, abu, dan nilai kalor memenuhi persyaratan Kelas 1 SNI 8966:2021, sedangkan kadar volatil, karbon tetap, dan kandungan bahan organik tidak memenuhi persyaratan standar tersebut yang ditujukan bagi bahan bakar berbasis biomassa. Sebagian besar parameter berada dalam rentang acuan RDF internasional, kecuali kadar volatil sampel A1 (93,00%) yang melampaui acuan ISTAC Turki (92,00%). Karbon tetap menunjukkan korelasi tertinggi dengan nilai kalor ($r = +0,676$), tetapi tidak signifikan secara statistik pada enam sampel. Dengan demikian, residu *gibrik* berpotensi menjadi bahan bakar substitusi industri padat energi, dengan pengujian klorin dan sulfur sebagai persyaratan evaluasi lanjutan.

Kata kunci: analisis proksimat, mesin gibrik, nilai kalor, refuse derived fuel, sampah residu

Abstract

The closure of the Piyungan Final Waste Processing Site (TPA) in the Special Region of Yogyakarta has created challenges for residual waste management in Sleman Regency. This study aims to evaluate the potential of residual waste generated by mechanical shredding and sorting machines (*gibrik*) as feedstock for *Refuse-Derived Fuel* (RDF) based on waste composition, proximate characteristics, and calorific value. Samples were collected over three days using simple random sampling at three Reduce, Reuse, Recycle Waste Processing Facilities (TPS 3R): Brama Muda, Randu Alas, and Bening. Waste composition analysis followed SNI 19-3964-1994, while proximate and calorific value analyses were conducted using ASTM methods. Fuel quality was evaluated against SNI 8966:2021 and selected international RDF standards. The results revealed that the residual waste was predominantly composed of plastics (91.14%), with moisture content ranging from 0.53% to 1.74%, ash content from 6.19% to 10.04%, volatile matter from 88.00% to 93.00%, and fixed carbon from 0.29% to 0.70%. Calorific values ranged from 28.63 to 29.61 MJ/kg (6,843.31–7,076.05 kcal/kg), equivalent to approximately 1.29 tonnes of coal per tonne of residual waste. Moisture content, ash content, and calorific value met the Class 1 requirements of SNI 8966:2021. However, volatile matter, fixed carbon, and organic matter content did not comply with this biomass-oriented standard. Most evaluated parameters were within international RDF reference ranges, except for the volatile matter content of sample A1 (93.00%), which exceeded the ISTAC Turkey reference value (92.00%). Fixed carbon exhibited the strongest correlation with calorific value ($r = +0.676$), although no statistically significant correlations were observed among the six samples. Overall, *gibrik*-processed residual waste demonstrates potential as an alternative fuel for energy-intensive industries, subject to further chlorine and sulfur content assessments.

Keywords: calorific value, gibrik machine, proximate analysis, refuse derived fuel, residual waste

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan ekonomi yang cepat, urbanisasi, dan peningkatan jumlah penduduk mendorong peningkatan konsumsi sumber daya yang pada akhirnya memperbesar timbunan sampah di lingkungan (Iyamu *et al.*, 2020). Sampah yang dianggap sebagai residu pada umumnya berakhir di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Pemerintah telah melakukan berbagai upaya dalam pengelolaan sampah, salah satunya melalui program pengolahan sampah berbasis Tempat Pengolahan Sampah *Reduce, Reuse, Recycle* (TPS 3R).

Berdasarkan Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) Tahun 2025, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, memiliki 31 unit TPS 3R yang tersebar dan beroperasi dengan jumlah sampah masuk serta sampah terkelola yang beragam. Setiap TPS 3R di wilayah Kabupaten Sleman memiliki alat atau teknologi pengelolaan sampah yang berbeda. Pada prinsipnya, penyelenggaraan TPS 3R menerapkan konsep *reduce, reuse, dan recycle*, yaitu upaya pengurangan sampah yang dilakukan pada sumbernya dalam skala komunal atau kawasan sehingga volume sampah yang diangkut ke TPA dapat berkurang secara signifikan (Kementerian PUPR, 2023; Sakti, 2022). Kerangka hukum pengelolaan sampah nasional menempatkan pengurangan sampah di sumber sebagai prioritas sebelum pemrosesan akhir (Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008). Namun, TPA Piyungan yang berlokasi di Kabupaten Bantul saat ini sudah tidak beroperasi lagi. Kondisi tersebut menyebabkan TPS 3R di Kabupaten Sleman mengalami kesulitan membuang residu hasil pengelolaan sampah yang telah dilakukan.

Kondisi tersebut mendorong sebagian TPS 3R melakukan praktik penanganan residu yang tidak ramah lingkungan, yaitu pembakaran terbuka, karena komposisi residunya sebagian besar berupa sampah mudah terbakar. Pembakaran sampah pada suhu rendah dan tanpa pengendalian emisi berpotensi meningkatkan beban pencemaran udara perkotaan (Liu *et al.*, 2025). Sebenarnya, beberapa TPS 3R berpotensi mengelola sampah residu yang berasal dari mesin *gibrik* atau mesin cacah pilah, yaitu mesin pemilah sampah organik dan anorganik yang telah tercampur. Tujuannya agar sampah organik dan anorganik dapat diolah sesuai karakteristiknya. Sampah organik dicacah menjadi ukuran kecil untuk pakan larva lalat (*maggot*), sedangkan sampah residu berupa plastik yang telah terpisah ditumpuk dan dipadatkan menggunakan mesin press hidrolik.

Tahap selanjutnya yang dapat dilakukan adalah pemanfaatan sampah residu hasil mesin *gibrik*. Sampah residu mudah terbakar dari hasil pengolahan menggunakan mesin *gibrik* dapat

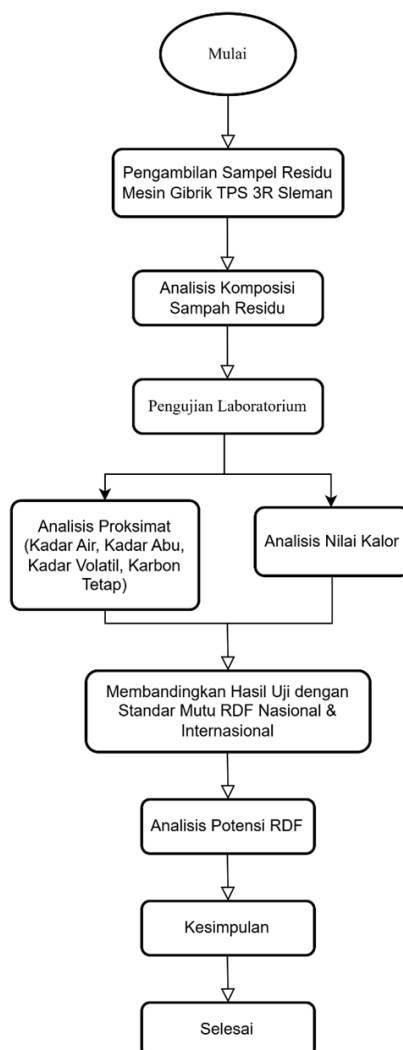
dimanfaatkan menjadi *Refuse-Derived Fuel* (RDF). RDF adalah bahan bakar padat yang diproduksi dari fraksi mudah terbakar sampah kota melalui proses pencacahan, pemilahan, pengeringan, dan pemadatan, serta telah banyak digunakan sebagai bahan bakar substitusi pada kiln semen (Fozer *et al.*, 2025; Sharma *et al.*, 2022; Rahotharn *et al.*, 2023). Di Indonesia, kajian potensi pemanfaatan sampah kota sebagai bahan baku RDF telah berkembang, baik pada skala TPA (Izaty *et al.*, 2018; Afifah *et al.*, 2023) maupun dalam bentuk kajian literatur (Faruqi dan Ainun, 2024). Perkembangan tersebut sejalan dengan meningkatnya perhatian terhadap kualitas bahan bakar turunan sampah di tingkat global (Gendebien *et al.*, 2003; Ismawati *et al.*, 2022). Beberapa parameter yang memengaruhi potensi bahan baku RDF adalah kadar air, kadar abu, kadar volatil, dan karbon tetap, yang ditentukan melalui analisis proksimat (Gidarakos *et al.*, 2006; Simbolon *et al.*, 2025). Analisis proksimat sangat penting untuk mengetahui seberapa efektif proses pembakaran dan energi panas yang dihasilkan, serta telah terbukti mampu memprediksi nilai kalor RDF secara andal (Günkaya *et al.*, 2023; Mondal dan Rafizul, 2025).

Sampah residu dari mesin *gibrik* di TPS 3R wilayah Kabupaten Sleman dianggap berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku RDF karena fraksi mudah terbakar dalam komposisi sampah cukup tinggi. Potensi besar ini dapat menjadi salah satu strategi bagi pengelola TPS 3R untuk mengelola sampah residu yang selama ini hanya dibakar, sekaligus mengurangi emisi karbon dari pengelolaan sampah (Fadhil dan Cundaningsih, 2025). Selain itu, pemanfaatan fraksi mudah terbakar sebagai bahan bakar alternatif turut menekan kebutuhan bahan bakar fosil pada industri (Abu-Elyazeed *et al.*, 2021). Berdasarkan latar belakang tersebut, dilakukan penelitian untuk menganalisis komposisi sampah, dilengkapi pengujian proksimat dan analisis nilai kalor sampah residu dari mesin *gibrik* di TPS 3R. Penelitian ini penting sebagai dasar pendukung pemanfaatan sampah residu sebagai bahan baku RDF, dengan harapan terwujudnya lingkungan yang lebih baik serta tersedianya bahan bakar alternatif yang dapat mensubstitusi sebagian kebutuhan bahan bakar fosil pada industri padat energi. Istilah bahan bakar alternatif dipilih karena produk yang dihasilkan dari residu mesin *gibrik* ini tidak diproduksi melalui proses biologis yang berkelanjutan, melainkan dipanen dari fraksi sampah yang sudah ada, sehingga lebih tepat digolongkan sebagai bahan bakar alternatif.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Kerangka penelitian

Penelitian ini secara garis besar dilakukan melalui pengambilan sampel residu sampah hasil pengolahan mesin cacah pilah/*gibrik* di TPS 3R wilayah Kabupaten Sleman, analisis komposisi sampah, pengujian laboratorium untuk parameter proksimat dan nilai kalor, lalu dilanjutkan dengan evaluasi kelayakan kualitas bahan bakar. Sebelum pengujian laboratorium, komposisi sampah residu ditentukan terlebih dahulu melalui pemisahan secara manual berdasarkan jenisnya. Pengujian analisis proksimat meliputi penentuan kadar air, kadar abu, kadar volatil, dan karbon tetap. Nilai energi sampel diukur melalui uji nilai kalor menggunakan *bomb calorimeter*. Hasil pengujian karakteristik fisik dan kimia tersebut kemudian dievaluasi dengan cara membandingkannya terhadap standar mutu RDF nasional maupun internasional. Tahapan penelitian secara lengkap diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.2 Pengumpulan data

2.2.1 Waktu dan lokasi

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juli hingga Agustus 2025 dengan pengambilan sampel dari tiga TPS 3R di wilayah Kabupaten Sleman, yaitu TPS 3R Brama Muda (TPS 3R A), TPS 3R Randu Alas (TPS 3R B), dan KSM Bening (TPS 3R C). Lokasi tersebut dipilih karena memiliki dan mengoperasikan mesin *gibrik*. Analisis sampel dilakukan di Laboratorium Kualitas Lingkungan, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia.

Tabel 1. Jadwal pengambilan sampel

Waktu	TPS 3R A	TPS 3R B	TPS 3R C
Hari ke-1	Sabtu, 12 Juli 2025	Senin, 28 Juli 2025	Rabu, 12 Agustus 2025
Hari ke-2	Senin, 14 Juli 2025	Selasa, 29 Juli 2025	Kamis, 13 Agustus 2025
Hari ke-3	Kamis, 24 Juli 2025	Rabu, 30 Juli 2025	Jumat, 14 Agustus 2025

Perbedaan dan ketidakseragaman jadwal pengambilan sampel di antara ketiga lokasi penelitian disebabkan oleh pertimbangan teknis dan kondisi operasional di lapangan. Variasi hari pelaksanaan serta adanya jeda waktu yang signifikan pada lokasi tertentu, seperti pada TPS 3R A antara hari ke-2 dan hari ke-3, disebabkan oleh penyesuaian terhadap jadwal operasional internal masing-masing fasilitas serta adanya perbaikan mesin di lokasi tersebut.

2.2.2 Pengambilan sampel

Pengambilan sampel dilakukan dengan teknik simple random sampling pada sampah residu yang keluar dari mesin *gibrik* di setiap TPS 3R. Populasi penelitian adalah seluruh residu yang dihasilkan mesin *gibrik* selama satu jam operasional, sedangkan kerangka pengambilan sampel (*sampling frame*) adalah tumpukan residu yang telah terpisah dari ayakan mesin. Pengacakan dilakukan dengan mengacak titik pada tumpukan residu, dengan cara ini setiap bagian tumpukan memiliki peluang yang sama untuk terambil, sehingga pemilihan titik tidak didasarkan pada jenis atau warna material yang terlihat. Pada titik terpilih, residu dimasukkan sampai penuh ke dalam box sampling 40 L, dihentakkan tiga kali, lalu tinggi sampahnya diukur. Prosedur ini diulang pada setiap jam pengambilan sesuai Tabel 2, sehingga setiap sampel merupakan hasil pengacakan pada jam operasional yang bersangkutan. Peluang yang sama pada setiap titik pengambilan inilah yang menjadikan prosedur ini tergolong *simple random sampling* dan bukan pengambilan sampel secara purposif. Pengambilan sampel dilakukan selama tiga hari dengan empat kali pengambilan selama TPS 3R beroperasi, sebagaimana

disajikan pada Tabel 2. Sampel diambil menggunakan box sampling berbentuk balok dengan volume 40 L. Pengambilan dilakukan dengan memasukkan sampah residu hingga penuh ke dalam boks sampling, kemudian dihentakkan sebanyak tiga kali, lalu diukur tinggi sampahnya.

Tabel 2. Waktu pengambilan sampel

Lokasi	Jam pengambilan	Rentang waktu	Sampel
TPS 3R A	1	09.00-10.00	A1
TPS 3R A	2	11.00-12.00	A1
TPS 3R A	3	13.00-14.00	A2
TPS 3R A	4	15.00-16.00	A2
TPS 3R B	1	09.00-10.00	B1
TPS 3R B	2	10.00-11.00	B1
TPS 3R B	3	11.00-12.00	B2
TPS 3R B	4	12.00-13.00	B2
TPS 3R C	1	09.00-10.00	C1
TPS 3R C	2	11.00-12.00	C1
TPS 3R C	3	13.00-14.00	C2
TPS 3R C	4	15.00-16.00	C2

Penentuan waktu pengambilan sampel didasarkan pada fluktuasi harian karakteristik sampah dan batasan jam operasional fasilitas. Oleh karena itu, pengambilan sampel dilakukan pada beberapa waktu berbeda dalam satu hari kerja agar data yang diperoleh lebih mewakili kondisi sampah residu. Pengambilan sampel dibatasi pada saat mesin *gibrik* beroperasi karena sampah residu yang menjadi objek penelitian hanya dihasilkan selama proses pengolahan berlangsung. Selain itu, pengambilan sampel di luar jam operasional dihindari untuk mencegah perubahan karakteristik sampah, khususnya kadar air, yang dapat berkurang akibat penguapan (Tumuluru *et al.*, 2021). Pengambilan sampel selama tiga hari kerja bertujuan meningkatkan tingkat kepercayaan data dan meminimalkan pengaruh kesalahan acak sehingga hasil analisis proksimat dan nilai kalor RDF yang diperoleh dapat menggambarkan kondisi sebenarnya.

Penggabungan sampel jam ke-1 dan jam ke-2 menjadi satu sampel pagi (A1, B1, C1) serta jam ke-3 dan jam ke-4 menjadi satu sampel siang (A2, B2, C2) dilakukan dengan mempertimbangkan keterbatasan kuantitas pengujian di laboratorium dan efisiensi biaya penelitian. Secara teknis, pengujian parameter proksimat dan nilai kalor untuk setiap jam secara terpisah membutuhkan biaya operasional besar dan waktu analisis yang lama. Oleh karena itu, metode pengambilan sampel gabungan ini dipilih sebagai langkah optimasi agar penelitian tetap berjalan efektif.

2.3 Analisis data

2.3.1 Komposisi sampah

Pengukuran komposisi sampah mengacu pada SNI 19-3964-1994 mengenai metode pengambilan dan pengukuran contoh timbunan dan komposisi sampah perkotaan. Sampel sampah yang diperoleh dari sampah residu hasil pengolahan menggunakan mesin *gibrik* dimasukkan ke dalam wadah yang dipisahkan sesuai titik pengambilannya, selanjutnya dipilah untuk pengukuran komposisi. Pemilahan komponen sampah dilakukan mengikuti klasifikasi komponen yang umum digunakan dalam karakterisasi sampah kota (Gidarakos *et al.*, 2006). Persentase komposisi setiap komponen dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\% \text{ komposisi sampah} = \frac{\text{berat komponen sampah}}{\text{berat total sampah}} \times 100\% \quad (1)$$

2.3.2 Analisis kadar air

Analisis kadar air mengacu pada ASTM E790-15 mengenai metode pengujian kadar air sisa pada sampel analisis RDF. Analisis dilakukan dengan memanaskan sampel di dalam oven pada suhu 110 °C selama 2 jam. Kadar air dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$\% \text{ kadar air} = \frac{(W_1 - W_0) - (W_2 - W_0)}{(W_1 - W_0)} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

W_0 = massa cawan kering (g)

W_1 = massa cawan + sampel basah (g)

W_2 = massa cawan + sampel kering (g)

2.3.3 Analisis kadar volatil

Kadar volatil ditentukan dengan memanaskan sampel di dalam *furnace* pada suhu 900 °C selama 7 menit. Perlakuan tersebut mengacu pada ASTM E897-88 (2004). Kadar volatil dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$\% \text{ kadar volatil} = \left(\frac{(\text{berat awal}) - (\text{berat akhir})}{(\text{berat awal})} \times 100\% \right) - \% \text{ kadar air} \quad (3)$$

Keterangan:

Berat awal = berat cawan + abu

Berat akhir = berat cawan + volatil

2.3.4 Analisis kadar abu dan karbon tetap

Kadar abu mengacu pada ASTM E830-87 (2004), yaitu ditentukan dengan memanaskan sampel di dalam *furnace* pada suhu 600 °C selama 30 menit, dan dihitung menggunakan

Persamaan (4). Kadar karbon tetap diketahui dari hasil pengujian kadar abu dan kadar volatil melalui Persamaan (5).

$$\% \text{ kadar abu} = \frac{(W_2 - W_0)}{(W_1 - W_0)} \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan:

W0 = massa cawan kering (g)

W1 = massa cawan + sampel basah (g)

W2 = massa cawan + sampel kering (g)

Penetapan karbon tetap menggunakan perhitungan pada Persamaan (5).

$$\% \text{ karbon tetap} = 100\% - (\% \text{ air} + \% \text{ volatil} + \% \text{ abu}) \quad (5)$$

2.3.5 Analisis nilai kalor

Pengujian nilai kalor mengacu pada ASTM D5865. Pengujian menggunakan 1 gram sampel yang ditempatkan pada *bomb calorimeter*. Penggunaan *bomb calorimeter* merupakan metode baku dalam penentuan nilai kalor bahan bakar padat, termasuk bahan bakar turunan sampah (Trombley *et al.*, 2023). Nilai kalor bruto (*gross calorific value*) dihitung menggunakan Persamaan (6). Persamaan (6) merupakan persamaan nilai kalor, bukan persamaan kadar air; unsur T dan E berturut-turut adalah kenaikan temperatur dan kapasitas panas kalorimeter, sedangkan e₁ sampai e₄ adalah faktor koreksi. Persamaan (2) sampai Persamaan (5) digunakan untuk menetapkan parameter proksimat, sedangkan Persamaan (6) khusus digunakan untuk menetapkan nilai kalor.

$$\text{Nilai kalor} = \frac{[(T)(E) - e_1 - e_2 - e_3 - e_4]}{m} \quad (6)$$

Keterangan:

T = temperatur koreksi (°C atau °F)

E = kapasitas panas kalorimeter (Cal/°C)

e₁ = koreksi asam (J)

e₂ = koreksi sumbu (J)

e₃ = koreksi sulfur (J)

e₄ = koreksi pembakaran (J)

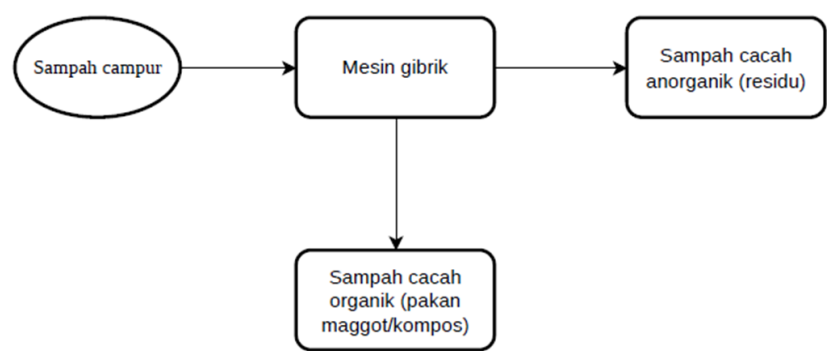
m = berat sampel (g)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengelolaan sampah di TPS 3R wilayah Kabupaten Sleman

Pengelolaan sampah di TPS 3R wilayah Kabupaten Sleman menggunakan mesin *gibrik* untuk operasional setiap harinya, dengan jenis mesin *gibrik* yang berbeda pada setiap lokasi

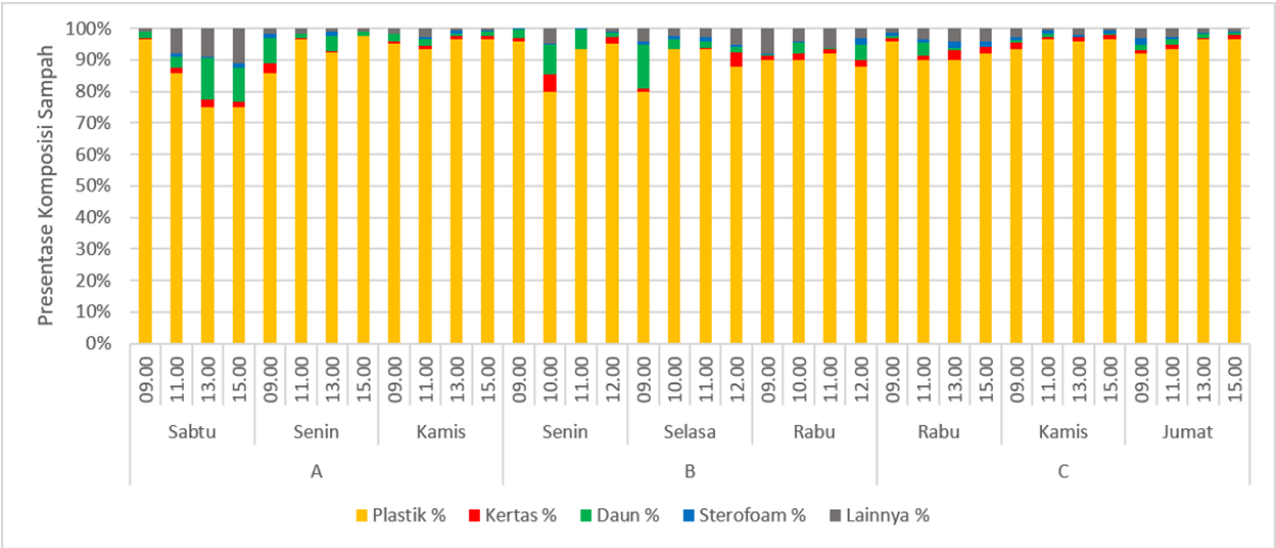
penelitian. Sebagian besar lokasi memiliki alur pengelolaan sampah yang sama, diawali area *drop off* untuk mengumpulkan sampah setelah pengambilan dari pelanggan, kemudian area pemilahan secara manual yang dibantu meja *conveyor* untuk memisahkan sampah anorganik yang masih dapat dijual kembali. Selanjutnya, sampah yang telah melewati meja *conveyor* masuk ke dalam mesin *gibrik* untuk proses pencacahan dan pemilahan sampah organik serta sampah residu. Ilustrasi pengelolaan sampah menggunakan mesin *gibrik* disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi proses mesin *gibrik*

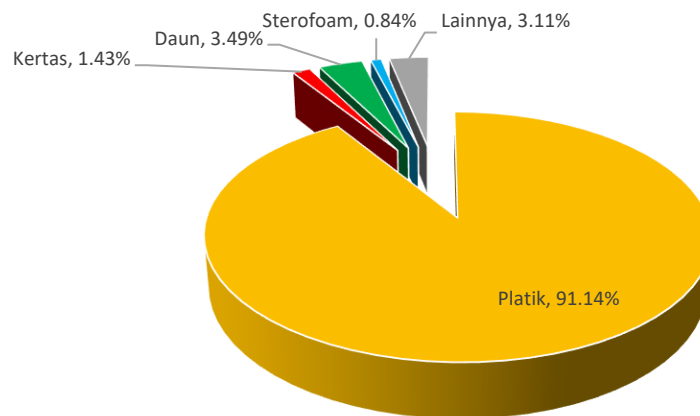
3.2 Komposisi sampah

Hasil analisis menunjukkan bahwa sampah plastik mendominasi pada setiap waktu pengambilan sampel, secara konsisten berada di atas 80% dan sering kali mendekati 100%, sebagaimana disajikan pada Gambar 3. Lokasi C merupakan area dengan komposisi plastik paling stabil dan tertinggi, ditandai minimnya campuran sampah organik. Sebaliknya, grafik tersebut memperlihatkan titik-titik waktu ketika persentase plastik menurun akibat lonjakan sampah organik dan kategori lainnya, yaitu pada Lokasi A di hari Sabtu siang (pukul 13.00 dan 15.00) serta Lokasi B pada Senin pagi (pukul 10.00) dan Selasa pagi (pukul 09.00).



Gambar 3. Komposisi sampah residu pada setiap waktu pengambilan sampel

Rata-rata hasil analisis seluruh lokasi pengambilan sampel memperlihatkan tingginya dominasi sampah plastik pada TPS 3R A, B, dan C (Gambar 4). Dengan persentase rata-rata gabungan mencapai 91,14%, plastik menjadi komponen utama yang proporsinya jauh melampaui gabungan seluruh komponen sampah lainnya. Komponen terbanyak kedua adalah daun yang hanya berkontribusi sebesar 3,49%, disusul kategori lainnya sebesar 3,11%, kertas (1,43%), dan *sterofoam* sebagai fraksi terkecil (0,84%). Rata-rata komposisi sampah di seluruh lokasi tersebut menunjukkan potensi yang sangat ideal sebagai bahan baku RDF.



Gambar 4. Persentase rata-rata komposisi sampah seluruh lokasi

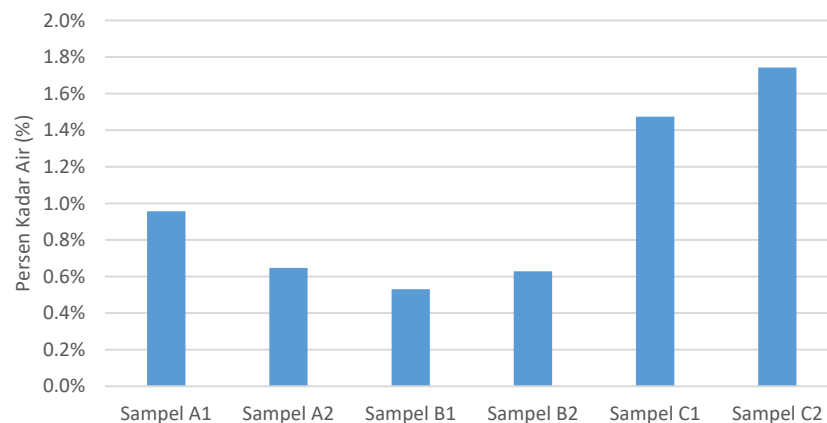
Tingginya persentase rata-rata plastik di atas 90% mengindikasikan nilai kalor yang tinggi untuk bahan baku RDF. Hal yang perlu diperhatikan pada analisis ini adalah meningkatnya sampah organik (daun) yang sebelumnya terdeteksi pada jam-jam tertentu di Lokasi A dan Lokasi B, tetapi dampaknya sangat kecil jika ditarik ke dalam skala rata-rata keseluruhan komposisi sampah. Angka daun yang hanya 3,49% mengindikasikan bahwa risiko penurunan kualitas RDF akibat tingginya kadar air dapat ditekan pada batas yang aman. Secara keseluruhan, data ini membuktikan efektivitas kinerja mesin *gibrik* sebagai pemilah dalam sampah residu dan berpotensi menjadi bahan baku RDF. Dominasi fraksi plastik juga sejalan dengan temuan pada TPA berumur tua, yang umumnya didominasi komponen mudah terbakar dan berpotensi dikonversi menjadi bahan bakar turunan sampah (Chiou dan Chen, 2021). Meskipun demikian, variabilitas komposisi antarwaktu pengambilan sampel menegaskan perlunya karakterisasi statistik pada sistem persampahan sebelum penentuan desain fasilitas RDF (Fierro Rivas *et al.*, 2026).

3.3 Analisis proksimat

Analisis proksimat merupakan analisis yang dilakukan untuk menentukan persentase kadar air, kadar volatil, kadar abu, dan kadar karbon tetap (Gidakos *et al.*, 2006). Metode yang digunakan mengacu pada *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Pada analisis ini, sampel yang dianalisis merupakan sampah residu berupa sampah plastik yang keluar dari mesin *gibrik*.

3.3.1 Analisis kadar air

Analisis kadar air mengacu pada ASTM E790-15 dengan tujuan memastikan pengukuran kadar air sisa sampel RDF dilakukan secara akurat dan konsisten. Hasil pengujian disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Persentase kadar air

Hasil pengujian menunjukkan kadar air sampel berbeda walaupun jenis sampah yang digunakan sama. Menurut Lokahita dan Damanhuri (2013), hal tersebut disebabkan oleh lokasi pengambilan sampel, kondisi TPS 3R, dan sumber sampah yang berbeda. Sampel B1 dan B2 menunjukkan hasil yang tidak berbeda jauh, demikian pula sampel C1 dan C2, sehingga memberikan bukti adanya pengaruh lokasi pengambilan sampel terhadap kadar air. Perbedaan kadar air antar lokasi juga dipengaruhi proses pengeringan biologis yang lazim diterapkan sebelum pembentukan RDF, karena *biodrying* secara signifikan menurunkan kadar air sampah kota (Zaman *et al.*, 2021) dan berpengaruh langsung terhadap nilai kalor produk yang dihasilkan (Bhatsada *et al.*, 2025).

Nilai kadar air memengaruhi kualitas RDF; semakin rendah kadar air dalam RDF, semakin tinggi nilai kalor yang dihasilkan. Berdasarkan Tabel 3, seluruh sampel menunjukkan

kadar air yang lebih rendah daripada ambang batas maksimum yang ditetapkan oleh standar Finlandia, Inggris, Swedia, Italia, ISTAC Turki, dan ketiga kelas SNI 8966:2021. Batas kadar air dicantumkan pada seluruh standar yang dibandingkan, sehingga untuk parameter ini pemenuhan terhadap seluruh standar tersebut dapat dinyatakan.

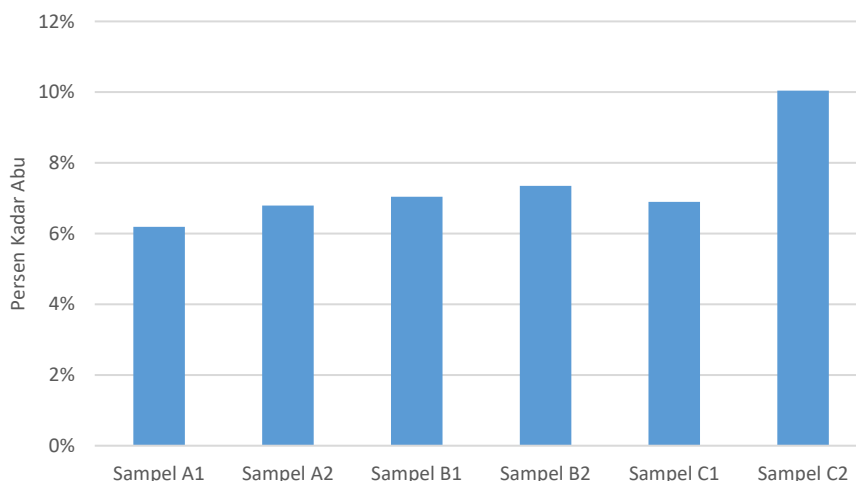
Tabel 3. Perbandingan hasil analisis kadar air dengan standar RDF di berbagai negara

Sampel	Kadar air	Finlandia ^a	Inggris ^a	Swedia ^b	Italia ^a	ISTAC (Turki) ^c	Indonesia ^d		
							1	2	3
Sampel A1	1%	23-25%	7-28%	<30%	<25%	25%	<15%	<20%	<25%
Sampel A2	1%								
Sampel B1	1%								
Sampel B2	1%								
Sampel C1	1%								
Sampel C2	2%								

Sumber: ^aNithikul (2007); ^bLokahita dan Damanhuri (2013); ^cSari (2012); ^dKementerian ESDM (2021)

3.3.2 Analisis kadar abu

Analisis kadar abu dilakukan setelah analisis kadar air dengan mengacu pada ASTM E830-87 (2004). Analisis kadar abu bertujuan mengetahui residu yang tersisa setelah pembakaran pada suhu tinggi. Hasil analisis disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Persentase kadar abu

Hasil pengujian menunjukkan persentase kadar abu pada sampel tergolong cukup rendah, yaitu berada pada kisaran 6,19% hingga 10,04%. Persentase terendah ditemukan pada Sampel A1 (6,19%), sedangkan persentase tertinggi terdapat pada Sampel C2 (10,04%). Rendahnya persentase tersebut terjadi karena sampel yang digunakan berupa sampah plastik (87% hingga 95%). Pada dasarnya, sampah plastik akan habis terbakar menjadi uap dan gas sehingga sisa padatan berupa abu yang ditinggalkan sangat sedikit. Kadar abu merupakan

residu pembakaran sempurna yang sudah tidak dapat terbakar lagi dan menjadi indikator utama kualitas RDF karena menentukan efisiensi termal serta beban penanganan residu (Günkaya *et al.*, 2023). Tingginya kandungan abu juga berhubungan dengan potensi kerak dan korosi pada tungku, serta meningkatnya kehilangan kalor akibat pembentukan abu terbang (Viccek *et al.*, 2021; Sharma *et al.*, 2022).

Hasil pengujian kadar abu menunjukkan adanya kaitan dengan parameter kadar air. Sampel C2 yang memiliki kadar air paling tinggi (1,74%) sekaligus menghasilkan kadar abu yang melonjak paling tinggi (10,04%). Secara kondisi lapangan, sampah yang lebih lembab membuat kotoran halus seperti debu, lumpur, dan pasir lebih mudah menempel pada permukaan plastik. Akibatnya, saat diproses melalui mesin *gibrik*, kotoran basah tersebut tercampur dan tetap ikut terbawa ke dalam sampah plastik. Ketika sampel dipanaskan di laboratorium, kandungan airnya menguap habis, namun kotoran tanah yang menempel tersebut tertinggal dan terukur sebagai lonjakan kadar abu. Selain berhubungan dengan kadar air, hasil pengujian kadar abu juga menunjukkan arah yang berlawanan dengan kadar volatil. Ketika kadar abu turun ke titik terendah pada Sampel A1 (6,19%), kadar volatilnya justru meningkat ke titik tertinggi di 93,00%. Sebaliknya, ketika abu naik ke angka 10,04% pada Sampel C2, kadar volatilnya turun ke 88,00%. Secara prinsip kerja bahan bakar, abu adalah material sisa yang tidak dapat terbakar, sehingga semakin banyak kandungan abu dalam bahan bakar, porsi zat yang dapat menghasilkan api secara otomatis berkurang.

Tabel 4. Perbandingan hasil analisis kadar abu dengan standar RDF di berbagai negara

Sampel	Kadar abu	Finlandia ^a	Inggris ^a	Swedia ^b	Italia ^a	ISTAC (Turki) ^c	Indonesia ^d		
							1	2	3
Sampel A1	6%	5-17%	12%	5-10%	20%	8%	<15%	<20%	<25%
Sampel A2	7%								
Sampel B1	7%								
Sampel B2	7%								
Sampel C1	7%								
Sampel C2	10%								

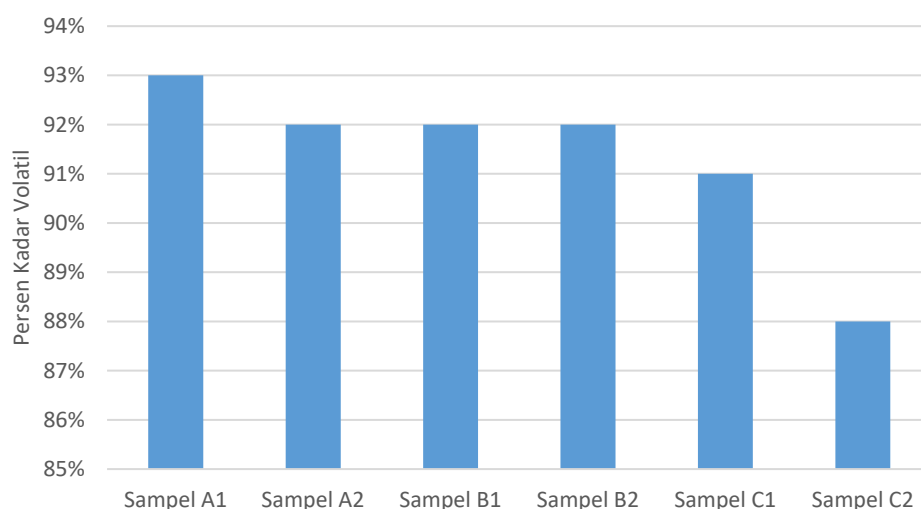
Sumber: ^aNithikul (2007); ^bLokahita dan Damanhuri (2013); ^cSari (2012); ^dKementerian ESDM (2021)

Berdasarkan Tabel 4, seluruh sampel menunjukkan kadar abu yang lebih rendah daripada batas maksimum yang ditetapkan oleh seluruh standar yang dibandingkan. Kadar abu merupakan parameter yang dicantumkan pada semua standar yang diacu, sehingga perbandingan ini bersifat menyeluruh dan pemenuhan terhadap seluruh standar tersebut dapat dinyatakan; hal ini berbeda dengan kadar volatil yang tidak dicantumkan pada sebagian

standar. Pada penerapan di dunia industri, kadar abu yang rendah sangat disukai karena dapat menjaga mesin pembakar tetap awet, mencegah penumpukan kerak di dalam tungku, serta menghemat biaya penanganan limbah debu. Meskipun jumlah abunya sedikit, komposisi abu tetap perlu diperhatikan karena abu dari fraksi organik dan kertas berpotensi mengandung natrium dan kalium yang menurunkan titik leleh abu. Pada tungku bersuhu tinggi, abu dengan kandungan natrium dan kalium yang tinggi berpotensi meleleh dan menempel pada dinding tungku sehingga menimbulkan kerak dan penyumbatan saluran gas (Borsuk *et al.*, 2025). Penilaian tersebut memerlukan uji suhu leleh abu mengikuti ASTM E953 yang belum dilakukan dalam penelitian ini. Selain itu, kadar klorin pada sampah plastik rumah tangga yang belum diuji pada penelitian ini berpotensi meningkatkan korosi dan pembentukan dioksin, sehingga parameter tersebut perlu dipastikan sebelum pemanfaatan skala industri (Gerassimidou *et al.*, 2021).

3.3.3 Analisis kadar volatil

Analisis kadar volatil dilakukan setelah analisis kadar abu dengan mengacu pada ASTM E897-88 (2004). Pengujian kadar volatil dilakukan untuk mengetahui seberapa besar porsi bahan bakar yang akan langsung menguap dan menyala saat terkena panas awal. Hasil pengujian disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Persentase kadar volatil

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar volatil merupakan komponen paling dominan pada seluruh sampel, dengan persentase mencapai 88,00% hingga 93,00%. Persentase tertinggi berada pada Sampel A1 (93,00%) dan terendah pada Sampel C2 (88,00%), dengan rata-rata 91,33%. Hal ini membuktikan sampel mampu menghasilkan panas yang

tinggi. Tingginya kadar volatil juga menyebabkan tingginya nilai kalor pada seluruh sampel (mencapai 6.843,31 hingga 7.076,05 Kkal/kg), yang memperlihatkan bahwa energi panas sampel dihasilkan oleh kobaran api dari gas, bukan dari pembakaran bara padat. Kadar volatil yang tinggi juga disebabkan oleh kadar air yang rendah. Menurut Damanhuri dan Padmi (2010), semakin rendah kadar air pada sampah, semakin tinggi kadar volatil sehingga proses pembakaran lebih mudah berlangsung. Karakter dominan volatil ini konsisten dengan perilaku termal bahan bakar turunan sampah yang dilaporkan pada studi termogravimetri, di mana kehilangan massa terbesar terjadi pada rentang suhu volatilisasi (Kuspangaliyeva *et al.*, 2021; Świechowski *et al.*, 2020).

Tabel 5. Perbandingan hasil analisis kadar volatil dengan standar RDF di berbagai negara

Sampel	Kadar volatil	Finlandia ^a	Inggris ^a	Swedia ^b	Italia ^a	ISTAC (Turki) ^c	Indonesia ^d		
							1	2	3
Sampel A1	93%	-	-	-	-	92%	maks. 65%	maks. 70%	maks. 75%
Sampel A2	92%	-	-	-	-				
Sampel B1	92%	-	-	-	-				
Sampel B2	92%	-	-	-	-				
Sampel C1	91%	-	-	-	-				
Sampel C2	88%	-	-	-	-				

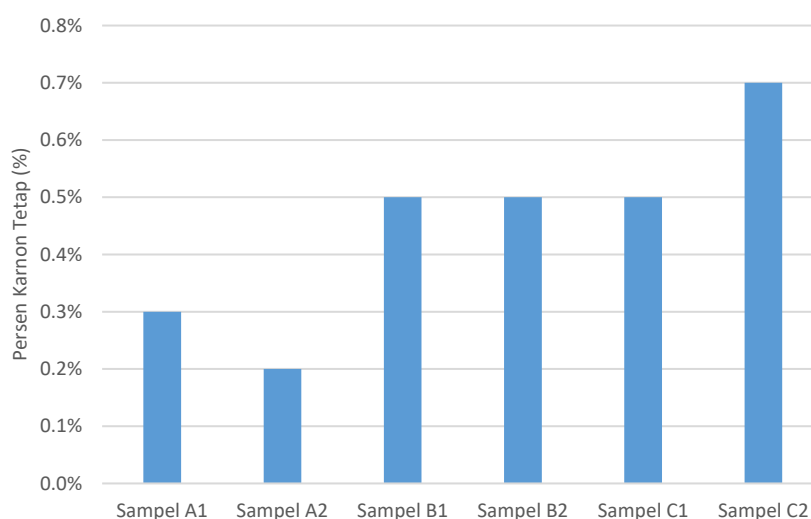
Sumber: ^aNithikul (2007); ^bLokahita dan Damanhuri (2013); ^cSari (2012); ^dKementerian ESDM (2021)

Perbandingan pada Tabel 5 menunjukkan kadar volatil sampel berada di atas nilai acuan yang tersedia. Tanda “-” pada tabel menandakan bahwa parameter kadar volatil tidak dicantumkan atau tidak dibandingkan pada standar yang bersangkutan, sehingga parameter ini hanya dapat dibandingkan dengan ISTAC Turki dan SNI 8966:2021. Terhadap ISTAC Turki yang mencantumkan kadar volatil sebesar 92,00%, Sampel A1 (93,00%) berada di atas nilai tersebut, sedangkan lima sampel lainnya berada pada atau di bawah nilai acuan itu (88,00%-92,00%). Perlu ditegaskan bahwa SNI 8966:2021 menetapkan kadar volatil sebagai batas maksimum, yaitu 65% untuk Kelas 1, 70% untuk Kelas 2, dan 75% untuk Kelas 3 (Wulandari *et al.*, 2024). Dengan nilai 88,00%-93,00%, sampel penelitian ini justru tidak memenuhi batas maksimum tersebut. Kadar volatil yang tinggi bukan berarti sampel bermutu rendah, melainkan mencerminkan sifat bahan bakar berbasis plastik yang hampir seluruh massanya menguap dan terbakar pada fase gas. Batas maksimum pada standar tersebut ditetapkan untuk bahan bakar biomassa agar tidak kehilangan terlalu banyak massa selama penyimpanan dan pengangkutan, sehingga tidak sepenuhnya sesuai untuk bahan bakar dengan fraksi plastik

dominan. Kadar volatil yang tinggi tetap menguntungkan karena menandakan sampel mudah menyala dan cepat mencapai suhu pembakaran (Świechowski *et al.*, 2020), namun konsekuensinya adalah penyimpanan harus dijaga dari panas dan kelembapan berlebih agar tidak terjadi pelepasan zat volatil sebelum pembakaran.

3.3.4 Analisis karbon tetap

Analisis karbon tetap dilakukan setelah analisis kadar abu dan kadar volatil. Analisis ini bertujuan mengetahui material yang tidak ter volatilisasi pada sampel. Hasil persentase karbon tetap disajikan pada Gambar 8.



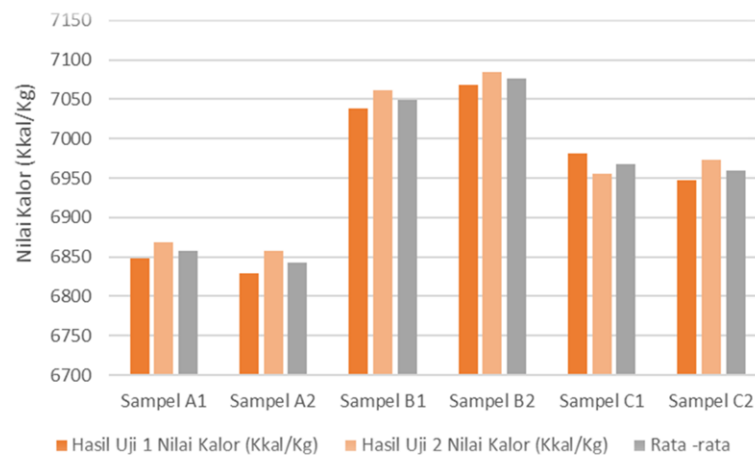
Gambar 8. Persentase karbon tetap

Karbon tetap merupakan sisa padatan karbon yang tertinggal dalam suatu material setelah kandungan air, zat yang mudah menguap, dan abu dihilangkan sepenuhnya. Berdasarkan hasil pengujian, nilai karbon tetap yang dihasilkan sangat rendah, yaitu berkisar 0,29% hingga 0,70%. Angka yang sangat rendah ini merupakan ciri khas komposisi sampah plastik. Berbeda dengan kayu atau batu bara yang meninggalkan banyak residu setelah dibakar, plastik cenderung langsung habis menguap menjadi gas. Rendahnya nilai karbon tetap ini dipengaruhi langsung oleh ketiga parameter lainnya, yaitu kadar volatil, kadar abu, dan kadar air. Karbon tetap pada dasarnya merupakan sisa persentase terakhir setelah ketiga zat tersebut dikeluarkan dari bahan bakar. Karena kadar volatil telah mendominasi hampir seluruh isi sampel (87% hingga 92%), ditambah porsi kadar abu (di bawah 11%) dan sedikit kadar air (di bawah 2%), ruang yang tersisa untuk membentuk arang padat secara otomatis menjadi sangat sempit, yaitu tidak sampai 1%. Proporsi karbon tetap tersebut menunjukkan bahwa energi

sampel hampir seluruhnya dilepaskan melalui fase volatil, sebagaimana umumnya terjadi pada bahan bakar turunan sampah dengan fraksi plastik tinggi (Mondal dan Rafizul, 2025).

3.3.5 Analisis nilai kalor

Penentuan nilai kalor dilakukan secara eksternal dengan mengacu pada ASTM D5865 dan menggunakan bomb calorimeter untuk setiap sampel. Hasil pengujian nilai kalor disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Nilai kalor sampel hasil pengujian duplo

Pengujian dilakukan dua kali dengan sampel yang sama (duplo) dan menunjukkan hasil yang tidak berbeda jauh. Nilai kalor rata-rata tertinggi diperoleh pada Sampel B2 sebesar 7.076,05 Kkal/kg, sedangkan nilai terendah terdapat pada Sampel A2 sebesar 6.843,31 Kkal/kg. Nilai kalor yang tinggi sangat dipengaruhi oleh kandungan kadar volatil, kadar abu, dan kadar air pada sampel tersebut. Namun, hasil analisis menunjukkan bahwa parameter proksimat (kadar air, abu, dan volatil) tidak selalu berbanding lurus dengan hasil uji nilai kalor. Hal ini terlihat jelas pada lokasi B (sampel B1 dan B2); meskipun kadar abunya lebih tinggi dan kadar volatilnya sedikit lebih rendah dibandingkan lokasi A (sampel A1 dan A2), nilai kalor lokasi B justru menjadi yang tertinggi. Kondisi ini dapat terjadi karena perbedaan jenis sampah pada setiap lokasi dan sampel. Dong dan Lee (2009) menyatakan bahwa perbedaan nilai kalor tiap komponen sampah lebih banyak dipengaruhi oleh karakteristik kimiawinya. Pada penelitian ini, sampel menggunakan sampah plastik acak sehingga nilai kalor lebih banyak dikendalikan oleh perbedaan jenis plastik yang secara acak terambil saat pengujian.

Lokahita dan Damanhuri (2013) mencatat bahwa jenis plastik LDPE (12.318,40 Kkal/kg) dan PP *cup* (11.912,80 Kkal/kg) memiliki energi yang lebih besar dibandingkan PET

bottle (5.450,85 Kkal/kg) ataupun PVC (5.187,91 Kkal/kg), sebagaimana juga dilaporkan Novita dan Damanhuri (2010). Selain itu, pengujian bomb calorimeter hanya menggunakan sampel berukuran sangat kecil, yaitu 1 gram. Kapasitas uji yang sedikit ini membuat komposisi potongan plastik di dalam cawan alat bersifat sangat acak (heterogen). Jika potongan plastik di lokasi B yang terambil kebetulan lebih banyak mengandung jenis LDPE atau PP, energi panasnya akan langsung menjadi tinggi sekaligus menutupi kekurangan kalori akibat sedikit kenaikan kadar air dan abu pada sampel tersebut. Keragaman nilai kalor antarsampel juga sejalan dengan sifat heterogen bahan bakar turunan sampah, sehingga pemodelan nilai kalor umumnya memerlukan pendekatan multivariabel (Bhatsada *et al.*, 2025) dan pencampuran bahan bakar sering diperlukan untuk menstabilkan kualitas pembakaran (Abu-Elyazeed *et al.*, 2021).

Tabel 6. Perbandingan hasil analisis nilai kalor dengan standar RDF di berbagai negara

Sampel	Nilai kalor (Kkal/kg)		Finlandia ^a	Inggris ^a	Swedia ^b	Italia ^a	ISTAC (Turki) ^c	Indonesia ^d		
	Uji 1	Uji 2						1	2	3
Sampel A1	6.848,10	6.868,00	3.105-3.821,5	4.469,41	5.708-7.428	3.582,68	3.500	4.776,92	3.582,69	2.388,46
Sampel A2	6.829,05	6.857,57								
Sampel B1	7.038,46	7.061,16								
Sampel B2	7.067,72	7.084,39								
Sampel C1	6.980,71	6.955,57								
Sampel C2	6.947,01	6.972,71								

Sumber: ^aNithikul (2007); ^bLokahita dan Damanhuri (2013); ^cSari (2012); ^dKementerian ESDM (2021)

Tabel 6 menunjukkan nilai kalor sampel yang cukup tinggi, dan seluruh standar yang dibandingkan mencantumkan nilai kalor sebagai parameter, sehingga sampel dapat dinyatakan memenuhi nilai kalor minimum pada standar Finlandia, Inggris, Swedia, Italia, ISTAC Turki, dan SNI 8966:2021. Perbandingan ini perlu dibaca dengan memperhatikan bahwa standar yang berbeda menggunakan basis pelaporan yang berbeda, yaitu nilai kalor bruto (*gross*) atau neto (*net*) serta basis kering (*dry*) atau basis terima (*as received*), sehingga angka pada Tabel 6 bersifat indikatif mengenai besaran relatif dan bukan hasil pembandingan yang seluruhnya setara basis. Dengan pengertian tersebut, sampah plastik yang diuji tetap berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku RDF karena semakin tinggi nilai kalor suatu bahan, semakin besar energi panas yang dapat dihasilkan saat dibakar.

3.4 Hubungan parameter proksimat dan nilai kalor

Untuk menilai parameter mana yang paling menentukan nilai kalor, dilakukan analisis korelasi Pearson antara setiap parameter proksimat, komposisi plastik, dan nilai kalor rata-rata tiap sampel. Hasil analisis disajikan pada Tabel 7. Koefisien korelasi positif menunjukkan hubungan searah, sedangkan koefisien negatif menunjukkan hubungan berlawanan arah.

Tabel 7. Koefisien korelasi *pearson* antara parameter karakteristik dan nilai kalor

Parameter	Koefisien korelasi (r)	Koefisien determinasi (r^2)	Arah hubungan
Karbon tetap	+0,676	0,457	Searah
Kadar abu	+0,235	0,055	Searah
Komposisi plastik	+0,155	0,024	Searah
Kadar air	-0,153	0,023	Berlawanan
Kadar volatil	-0,135	0,018	Berlawanan

Karbon tetap menunjukkan koefisien korelasi tertinggi ($r = +0,676$), searah dengan nilai kalor. Temuan ini sejalan dengan Novita dan Damanhuri (2010) yang menyatakan kadar karbon tetap yang tinggi umumnya menunjukkan nilai kalor yang tinggi. Namun, hubungan ini perlu dibaca secara hati-hati karena karbon tetap dihitung sebagai selisih, bukan diukur langsung, sehingga nilainya bergantung pada ketiga parameter lainnya (Nowak, 2023). Kadar abu dan komposisi plastik juga menunjukkan hubungan searah yang lemah, sedangkan kadar air dan kadar volatil menunjukkan hubungan berlawanan arah. Arah hubungan kadar air berlawanan dengan nilai kalor sesuai prinsip bahwa air menyerap sebagian panas pembakaran sehingga menurunkan nilai kalor efektif (Luqman *et al.*, 2023).

Arah hubungan kadar volatil yang berlawanan dengan nilai kalor tampak berlawanan dengan penjelasan pada Subbab 3.3.3, dan hal ini perlu dijelaskan dengan jujur. Kadar volatil seluruh sampel berada pada rentang yang sangat sempit (88,00%-93,00%), sehingga variasi kadar volatil tidak lagi mampu membedakan nilai kalor antarsampel. Pada rentang yang sempit, parameter yang variasinya lebih besar seperti kadar abu dan jenis plastik penyusun sampel justru lebih menentukan. Kondisi ini menunjukkan bahwa kadar volatil yang tinggi merupakan syarat perlu agar sampel mudah menyala, tetapi bukan penentu utama besarnya nilai kalor.

Perlu ditegaskan bahwa dengan jumlah sampel hanya enam, tidak ada satu pun koefisien korelasi yang signifikan secara statistik. Nilai r kritis pada taraf nyata 5% adalah 0,811 untuk $n = 6$ (derajat bebas 4) dan 0,878 untuk $n = 5$ (derajat bebas 3). Koefisien korelasi kadar abu terhadap nilai kalor meningkat menjadi +0,822 bila sampel C2 dikeluarkan dari

perhitungan, yang mengindikasikan bahwa sampel C2 berperan sebagai pencilan karena kadar abunya menyimpang jauh (10,04%) akibat kotoran tanah yang menempel. Dengan demikian, angka pada Tabel 7 harus dibaca sebagai indikasi awal mengenai kecenderungan hubungan antarvariabel, bukan sebagai bukti hubungan yang telah teruji. Pengujian dengan jumlah sampel yang lebih besar diperlukan sebelum hubungan tersebut dipakai untuk memprediksi nilai kalor secara kuantitatif, sebagaimana pendekatan pemodelan yang dikembangkan pada studi lain (Syguła *et al.*, 2021; Luqman *et al.*, 2023).

3.5 Kesesuaian mutu terhadap standar nasional dan internasional

Pemeriksaan kesesuaian mutu tidak cukup dilakukan dengan membandingkan nilai hasil pengujian terhadap satu ambang batas, karena Standar Nasional Indonesia untuk bahan bakar jumputan padat membedakan mutu ke dalam tiga kelas. SNI 8966:2021 tentang Bahan Bakar Jumputan Padat untuk Pembangkit Listrik menetapkan persyaratan yang berbeda untuk Kelas 1, Kelas 2, dan Kelas 3. Bobot sampel yang dianalisis dalam penelitian ini dibandingkan secara menyeluruh terhadap ketiga kelas tersebut, dan hasilnya disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Kesesuaian hasil penelitian terhadap persyaratan SNI 8966:2021

Parameter	Satuan	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Hasil penelitian	Kesesuaian
Kadar air	% massa	<15	<20	<25	0,53-1,74	Memenuhi Kelas 1
Kadar abu	% massa	<15	<20	<25	6,19-10,04	Memenuhi Kelas 1
Kadar volatil (maks.)	% massa	65	70	75	88,00-93,00	Tidak memenuhi kelas mana pun
Karbon tetap (min.)	% massa	15	10	5	0,29-0,70	Tidak memenuhi kelas mana pun
Nilai kalor (netto)	MJ/kg	≥ 20	≥ 15	≥ 10	28,63-29,61	Memenuhi Kelas 1
Bahan organik (min.)	% massa	95	87,5-95	80-87,5	5-13	Tidak memenuhi kelas mana pun
Sulfur total	% massa	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	Tidak diuji	Belum dapat dinilai (tidak diuji)
Kadar klorida	% massa	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1	Tidak diuji	Belum dapat dinilai (tidak diuji)

Sumber: Badan Standardisasi Nasional (2021)

Hasil perbandingan tersebut mengubah kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini. Untuk parameter kadar air, kadar abu, dan nilai kalor, sampel memenuhi persyaratan Kelas 1, yaitu kelas mutu tertinggi. Nilai kalor sampel sebesar 28,63-29,61 MJ/kg (6.843,31-7.076,05 Kkal/kg) jauh melampaui syarat minimum Kelas 1 sebesar 20 MJ/kg, bahkan melampaui nilai kalor batubara Indonesia yang umumnya berkisar 4.200-5.400 Kkal/kg (sekitar 17,6-22,6

MJ/kg). Namun, untuk tiga parameter lainnya sampel tidak memenuhi persyaratan SNI 8966:2021 sama sekali, termasuk Kelas 3 yang merupakan kelas mutu terendah.

Ketidaksesuaian tersebut bukan berarti sampel tidak layak dimanfaatkan, melainkan menunjukkan bahwa SNI 8966:2021 tidak dirancang untuk bahan bakar yang hampir seluruhnya tersusun dari plastik. Standar tersebut mensyaratkan kandungan bahan organik sekurang-kurangnya 80% agar bahan bakar tergolong biomassa untuk pembangkit listrik, sedangkan sampel penelitian ini hanya mengandung 5%–13% bahan organik. Syarat karbon tetap minimum (>5% bahkan untuk Kelas 3) dan batas maksimum kadar volatil (65%-75%) juga berorientasi pada bahan bakar biomassa yang menyisakan lebih banyak arang padat. Sampel dengan fraksi plastik 91,14% memiliki sifat yang berlawanan, yaitu hampir seluruh energinya dilepaskan melalui fase volatil dan hanya menyisakan karbon tetap di bawah 1%. Dengan demikian, parameter karbon tetap yang tidak dipenuhi tersebut sesungguhnya merupakan konsekuensi langsung dari sifat bahan, bukan penanda mutu yang rendah. Keadaan serupa dilaporkan oleh Wulandari *et al.* (2024), yang menemukan bahan bakar jumputan dari campuran sampah organik dan plastik LDPE memenuhi SNI 8966:2021 pada seluruh parameter kecuali karbon tetap. Temuan tersebut digunakan sebagai pembandingan hasil penelitian, sedangkan seluruh nilai persyaratan pada Tabel 8 mengacu langsung pada SNI 8966:2021.

Oleh karena itu, arah pemanfaatan yang paling sesuai bagi residu mesin *gibrik* adalah sebagai bahan bakar substitusi (*alternative fuel*) pada industri padat energi, khususnya *kiln* semen. Arah ini tidak disusun sebagai opini, melainkan dari pembandingan terhadap persyaratan teknis yang berlaku pada proses tersebut. *Kiln* semen *rotary* beroperasi pada zona pembakaran bertemperatur 1.400-1.500 °C dengan waktu tinggal 3-6 detik di atas 1.200 °C, sehingga mampu membakar bahan bakar berkadar volatil tinggi secara tuntas dan memanfaatkan abu residunya sebagai bahan baku klinker (Sharma *et al.*, 2022; Borsuk *et al.*, 2025). Persyaratan mutu RDF untuk *kiln* semen di Indonesia umumnya menetapkan nilai kalor minimum sekitar 3.200 Kkal/kg, kadar air maksimum 25%, sulfur maksimum 0,6%, dan klorin maksimum 0,9%-1,25% bergantung pada desain *kiln* (Gerassimidou *et al.*, 2021; Kusuma *et al.*, 2024). Terhadap persyaratan tersebut, sampel penelitian ini telah memenuhi syarat nilai kalor (6.843,31-7.076,05 Kkal/kg) dan kadar air (0,53%-1,74%) secara meyakinkan, sedangkan kadar klorin dan sulfur belum diuji sehingga kelayakannya pada *kiln* semen belum dapat dinyatakan secara penuh. Pada praktik di industri semen Indonesia, laju substitusi termal

masih berkisar 15%-40% dan peningkatannya dilakukan secara bertahap (Kusuma *et al.*, 2024), sehingga kontribusi residu TPS 3R lebih berperan sebagai pelengkap bahan bakar, bukan pengganti penuh bahan bakar fosil. Standar internasional untuk bahan bakar turunan sampah, seperti kerangka klasifikasi *solid recovered fuel*, memang dirancang untuk memuat rentang nilai kalor, kadar abu, dan kadar klorin yang lebih lebar dibanding standar biomassa, sehingga lebih sesuai untuk bahan bakar berbasis plastik (Gerassimidou *et al.*, 2021). Pada Tabel 3 sampai Tabel 6, sampel penelitian juga telah dibandingkan terhadap rentang standar RDF Finlandia, Inggris, Swedia, Italia, dan ISTAC Turki pada parameter yang tersedia nilai pembandingnya; parameter yang tidak dicantumkan pada suatu standar tidak diikutkan dalam penilaian.

3.6 Potensi gangguan operasional, keselamatan, dan pengendalian pencemaran

Karakteristik yang menguntungkan pada sisi energi menyimpan konsekuensi pada sisi operasional dan lingkungan. Bagian ini membahas risiko tersebut secara eksplisit agar penilaian potensi RDF tidak berhenti pada nilai kalor yang tinggi. Pertama, kandungan klorin dan sulfur belum diuji dalam penelitian ini. Keduanya merupakan parameter yang dibatasi secara ketat pada SNI 8966:2021, yaitu sulfur total maksimum 1,5% dan klorida maksimum 0,2%-1% bergantung kelasnya (Wulandari *et al.*, 2024). Sampah plastik rumah tangga berpotensi mengandung polivinil klorida (PVC) dan plastik berlapis yang menyumbang klorin, sedangkan klorin merupakan pemicu utama pembentukan korosi pada peralatan dan pembentukan dioksin pada pembakaran bertemperatur relatif rendah (Gerassimidou *et al.*, 2021). Karena sampel penelitian diambil secara acak dari residu mesin *gibrik* tanpa pemilahan ulang berdasarkan jenis plastik, kandungan klorin dan sulfur pada sampel tidak dapat dipastikan rendah. Pengujian ultimate analysis dan penentuan kadar klorin perlu dilakukan sebelum pemanfaatan pada skala penuh.

Kedua, sifat abu perlu dinilai dari komposisi kimianya dan bukan dari jumlahnya. Kadar abu yang rendah tidak dengan sendirinya berarti abu mudah meleleh, karena titik leleh abu ditentukan oleh komposisi oksida penyusunnya, terutama perbandingan natrium oksida (Na_2O) dan kalium oksida (K_2O) terhadap silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3). Penentuan sifat ini memerlukan uji suhu leleh abu mengikuti ASTM E953, yang belum dilakukan dalam penelitian ini. Pada tahap ini yang dapat dinyatakan adalah bahwa jumlah abu yang terbentuk relatif sedikit (6,19%-10,04%), sehingga beban penanganan residu abu dan potensi kehilangan kalor akibat pembentukan abu terbang juga terbatas (Viczek *et al.*, 2021;

Sharma *et al.*, 2022). Sebaliknya, kadar karbon tetap yang sangat rendah (0,29%-0,70%) hanya menunjukkan bahwa energi sampel dilepaskan melalui fase volatil dan tidak dapat dipakai untuk menyimpulkan perilaku pelelehan abu. Risiko pengendapan kerak (*slagging*) dan penyumbatan saluran gas (*fouling*) tetap perlu dinilai melalui pengujian suhu leleh abu dan pengaturan suhu pembakaran sebelum pemanfaatan pada skala penuh (Borsuk *et al.*, 2025).

Ketiga, kondisi eksisting penanganan residu di TPS 3R berupa pembakaran terbuka perlu dinilai secara terpisah. Pembakaran terbuka pada suhu rendah dan tanpa pengendalian emisi menghasilkan partikulat halus serta senyawa organik berbahaya, termasuk hidrokarbon aromatik polisiklik, poliklorinasi bifenil, dan dioksin, yang berdampak langsung pada kesehatan pekerja dan masyarakat sekitar (Cheng *et al.*, 2020; Xia *et al.*, 2022). Dengan demikian, pengalihan residu dari pembakaran terbuka ke fasilitas pembakaran terkendali memberikan manfaat kesehatan dan lingkungan yang nyata, terlepas dari perhitungan energi. Manfaat tersebut hanya dapat dicapai apabila residu diolah pada fasilitas dengan pengendalian suhu dan pengendalian pencemaran udara yang memadai, bukan pada tungku sederhana.

Keempat, aspek keselamatan kerja dan mutu produk turut menentukan. Pengeringan dan pemadatan residu plastik perlu memperhatikan ukuran partikel dan kadar air agar diperoleh produk dengan kerapatan energi yang stabil dan tidak mudah hancur selama pengangkutan (Rezaei *et al.*, 2021). Nilai kalor sampel yang bervariasi menurut jenis plastik penyusunnya juga menyiratkan perlunya pencampuran bahan baku agar mutu produk relatif seragam, sebagaimana dianjurkan pada studi ketidakpastian mutu bahan bakar turunan sampah (Tahir *et al.*, 2023).

3.7 Estimasi potensi pemanfaatan pada skala kabupaten

Estimasi potensi pemanfaatan disusun secara parametrik per satuan massa residu, bukan sebagai angka total, karena penelitian ini tidak mengukur laju timbunan residu harian di ketiga TPS 3R. Pendekatan ini dipilih agar angka yang disajikan tidak melebihi data yang benar-benar terukur. Berdasarkan nilai kalor rata-rata hasil pengujian sebesar 6.959,20 Kkal/kg, setiap 1 ton residu mesin *gibrik* mengandung energi sekitar 6,96 Gkal. Batubara Indonesia dengan nilai kalor 5.400 Kkal/kg mengandung energi sekitar 5,40 Gkal per ton, sehingga secara kesetaraan energi setiap 1 ton residu setara dengan sekitar 1,29 ton batubara.

Angka pada Tabel 9 merupakan batas atas teoretis dan bukan proyeksi yang dapat langsung digunakan. Terdapat empat alasan. Pertama, efisiensi pembakaran pada fasilitas sesungguhnya selalu lebih rendah daripada nilai kalor bruto bahan bakar, sehingga energi yang

benar-benar termanfaatkan lebih kecil. Kedua, laju substitusi pada kiln semen umumnya dibatasi untuk menjaga mutu produk dan menghindari gangguan operasional, sehingga tidak seluruh kebutuhan bahan bakar dapat digantikan. Ketiga, faktor emisi batubara bergantung pada jenis dan peringkat batubara yang digunakan, sehingga angka 94,6 kg CO₂/GJ hanya bersifat indikatif. Keempat, perhitungan ini belum memasukkan emisi dari proses pengangkutan, pencacahan, dan pengeringan residu.

Tabel 9. Estimasi parametrik kesetaraan energi per ton residu mesin *gibrik*

Besaran	Nilai	Satuan	Dasar perhitungan
Nilai kalor rata-rata residu	6.959,20	Kkal/kg	Hasil pengujian 6 sampel
Energi per ton residu	6,96	Gkal/ton	Nilai kalor dikalikan 1.000 kg
Nilai kalor acuan batubara	5.400	Kkal/kg	Rentang batubara Indonesia 4.200-5.400
Energi per ton batubara	5,40	Gkal/ton	Nilai kalor dikalikan 1.000 kg
Kesetaraan substitusi batubara	1,29	ton batubara/ton residu	Perbandingan energi per ton
Faktor emisi batubara (indikatif)	94,6	kg CO ₂ /GJ	Acuan faktor emisi sub-bituminus
Emisi batubara yang dihindari	2,76	ton CO ₂ /ton residu	Energi substitusi dikalikan faktor

Meskipun demikian, angka parametrik tersebut cukup untuk menunjukkan bahwa fraksi residu yang selama ini hanya dibakar memiliki nilai energi yang berarti. Jika rata-rata satu TPS 3R mengolah beberapa ton residu per hari, maka potensi energi yang terbuang menjadi signifikan ketika dihitung untuk 31 unit TPS 3R yang beroperasi di Kabupaten Sleman sebagaimana tercatat pada SIPSN Tahun 2025. Pengukuran laju timbunan residu harian di setiap TPS 3R menjadi langkah lanjutan yang diperlukan sebelum penyusunan rencana pemanfaatan pada skala kabupaten, sejalan dengan pendekatan pemanfaatan sampah kota sebagai bahan bakar padat terbarukan yang telah dikembangkan di Indonesia (Triyono *et al.*, 2019).

3.8 Analisis potensi bahan baku RDF pada sampah residu

Ringkasan hasil analisis komposisi, analisis proksimat, dan nilai kalor pada setiap lokasi disajikan pada Tabel 10. Sampah plastik memiliki kandungan energi tinggi yang dapat dimanfaatkan menjadi bahan baku RDF. Dengan hasil komposisi sampah plastik yang dijadikan sampel penelitian ini, komposisi sampah plastik di TPS 3R wilayah Kabupaten Sleman dapat dimanfaatkan menjadi bahan baku RDF. Pada Tabel 10 dapat dilihat bahwa setiap lokasi memiliki persentase yang tidak berbeda jauh untuk komposisi plastiknya. Berdasarkan analisis proksimat yang telah dilakukan, setiap lokasi memiliki kandungan air yang cukup rendah sehingga seluruh lokasi penelitian memenuhi batas kadar air pada standar RDF yang

dibandingkan dan dapat dimanfaatkan menjadi bahan baku RDF. Kadar air yang rendah juga memengaruhi kadar volatil pada sampel; kadar volatil seluruh sampel berada pada atau di bawah nilai acuan ISTAC Turki (92,00%) kecuali Sampel A1 (93,00%), sedangkan terhadap SNI 8966:2021 kadar volatil sampel berada di atas batas maksimum karena standar tersebut disusun untuk bahan bakar biomassa.

Tabel 10. Hasil analisis komposisi sampah, kadar air, kadar abu, kadar volatil, karbon tetap, dan nilai kalor di setiap lokasi

Lokasi	Sampel	Komposisi sampah plastik	Kadar air	Kadar abu	Kadar volatil	Karbon tetap	Nilai kalor (Kkal/kg)
A	A1	92%	0,96%	6,19%	93,00%	0,32%	6.858,05
A	A2	87%	0,65%	6,79%	92,00%	0,29%	6.843,31
B	B1	88%	0,53%	7,04%	92,00%	0,55%	7.049,81
B	B2	92%	0,63%	7,35%	92,00%	0,52%	7.076,05
C	C1	94%	1,47%	6,90%	91,00%	0,53%	6.968,14
C	C2	95%	1,74%	10,04%	88,00%	0,70%	6.959,86
Standar deviasi		3,20%	0,50%	1,36%	1,75%	0,15%	95,51

Kadar abu juga menjadi salah satu parameter yang memengaruhi kualitas bahan baku RDF. Hasil analisis menunjukkan kadar abu setelah pengujian pada sampel berada di bawah batas maksimum pada seluruh standar yang dibandingkan. Nilai kalor yang diperoleh setelah pengujian menunjukkan hasil yang cukup tinggi, yang dapat terjadi karena pengaruh kadar air yang rendah dan kadar volatil yang tinggi. Dengan demikian, nilai kalor pada setiap sampel telah memenuhi nilai kalor minimum pada standar yang dibandingkan, sehingga sampel dapat dikatakan berpotensi menjadi bahan baku RDF. Pemenuhan seluruh parameter tersebut menunjukkan bahwa fraksi residu mesin *gibrik* berpotensi mensubstitusi sebagian bahan bakar fosil, sebagaimana ditunjukkan pada studi pemanfaatan RDF sebagai bahan bakar substitusi di industri semen (Salaripoor *et al.*, 2025; Sharma *et al.*, 2022; Viczek *et al.*, 2021).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis komposisi, karakteristik proksimat, dan nilai kalor sampah residu hasil pengolahan mesin cacah pilah/*gibrik* di TPS 3R wilayah Kabupaten Sleman untuk mengetahui potensinya sebagai bahan baku *Refuse-Derived Fuel* (RDF). Hasil analisis komposisi menunjukkan sampah residu didominasi sampah plastik dengan persentase rata-rata seluruh lokasi sebesar 91,14%, yaitu pada Lokasi A sebesar 92% dan 87%, Lokasi B sebesar 88% dan 92%, serta Lokasi C sebesar 94% dan 95%. Tingginya persentase sampah plastik tersebut

menunjukkan sampah residu memiliki karakteristik material yang mudah terbakar dan berpotensi digunakan sebagai bahan baku RDF.

Hasil analisis proksimat menunjukkan sampah residu memiliki kadar air 0,53%-1,74%, kadar abu 6,19%-10,04%, kadar volatil 88,00%-93,00%, dan karbon tetap 0,29%-0,70%. Nilai kalor berkisar 6.843,31-7.076,05 Kkal/kg (28,63-29,61 MJ/kg), jauh melampaui nilai kalor batubara Indonesia (4.200-5.400 Kkal/kg). Kadar air, kadar abu, dan nilai kalor memenuhi persyaratan Kelas 1 SNI 8966:2021, yaitu kelas mutu tertinggi, dan parameter kadar air, kadar abu, serta nilai kalor berada dalam rentang standar RDF Finlandia, Inggris, Swedia, Italia, serta ISTAC Turki pada parameter yang tersedia nilai pembandingnya. Kadar volatil tidak dapat dinyatakan memenuhi seluruh standar tersebut karena sebagian standar tidak mencantumkan parameter ini, sedangkan terhadap ISTAC Turki (92,00%) lima dari enam sampel berada pada atau di bawah nilai acuan tersebut dan Sampel A1 (93,00%) berada di atasnya. Namun, kadar volatil, karbon tetap, dan kandungan bahan organik tidak memenuhi SNI 8966:2021 karena standar tersebut disusun untuk bahan bakar berbasis biomassa dengan kandungan organik minimal 80%, sedangkan sampel penelitian ini mengandung bahan organik hanya 5%-13%.

Analisis korelasi menunjukkan karbon tetap memiliki hubungan searah paling kuat dengan nilai kalor ($r = +0,676$), sedangkan kadar air dan kadar volatil berhubungan berlawanan arah. Meskipun demikian, dengan enam sampel tidak ada korelasi yang signifikan secara statistik sehingga angka tersebut harus dibaca sebagai indikasi awal, bukan bukti hubungan yang telah teruji. Estimasi parametrik menunjukkan setiap 1 ton residu mesin *gibrik* setara dengan sekitar 1,29 ton batubara, sehingga pemanfaatan residu ini berpotensi menurunkan konsumsi bahan bakar fosil sekaligus emisi karbon pada industri pengguna.

Berdasarkan seluruh hasil tersebut, sampah residu hasil pengolahan di TPS 3R wilayah Kabupaten Sleman memiliki karakteristik yang mendukung pemanfaatannya sebagai bahan bakar alternatif, terutama sebagai bahan bakar substitusi pada industri padat energi seperti kiln semen, dan lebih tepat diarahkan pada pemanfaatan tersebut daripada dipaksa memenuhi standar bahan bakar jumpatan padat untuk pembangkit listrik. Pengujian kadar klorin dan sulfur, serta pengukuran laju timbulan residu harian di setiap TPS 3R, merupakan langkah lanjutan yang diperlukan sebelum penyusunan rencana pemanfaatan pada skala kabupaten.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pengelola TPS 3R Brama Muda, TPS 3R Randu Alas, dan KSM Bening di Kabupaten Sleman atas izin dan bantuan selama pengambilan sampel, serta kepada Laboratorium Kualitas Lingkungan, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia atas fasilitas pengujian yang diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Elyazeed, O. S. M., Nofal, M., Ibrahim, K., Yang, J. (2021). Co-combustion of RDF and biomass mixture with bituminous coal: A case study of clinker production plant in Egypt. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 3(4), 257-266. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42768-021-00081-0>
- Afifah, N. A., Shabrina, H. M., Sobirin, A., Pratiwi, D. (2023). Potensi sampah TPA Banyuroto Kabupaten Kulon Progo sebagai Refuse Derived Fuel (RDF). *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 8(3), 147-156. DOI: <https://doi.org/10.29244/jsil.8.03.147-156>
- American Society for Testing and Materials. (2004). ASTM E830-87 (Reapproved 2004): Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel. ASTM International, West Conshohocken.
- American Society for Testing and Materials. (2004). ASTM E897-88 (Reapproved 2004): Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel. ASTM International, West Conshohocken.
- American Society for Testing and Materials. (2010). ASTM D5865-10: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. ASTM International, West Conshohocken.
- American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM E790-15: Standard Test Method for Residual Moisture in Refuse-Derived Fuel Analysis Samples. ASTM International, West Conshohocken.
- American Society for Testing and Materials. (2023). ASTM E953-23: Standard Practice for Fusibility of Refuse-Derived Fuel (RDF) Ash. ASTM International, West Conshohocken. 2023.
- Badan Standardisasi Nasional. (2021). SNI 8966:2021 Bahan Bakar Jumputan Padat untuk Pembangkit Listrik. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Bhatsada, A., Patumsawad, S., Towprayoon, S., Chiemchaisri, C. Wangyao, K. (2025). Development of multivariable model for predicting heating value of bio-dried refuse-derived fuel from municipal solid waste. *Biomass and Bioenergy*, 197, 107795. DOI: [10.1016/j.biombioe.2025.107795](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107795)
- Borsuk, G., Wydrych, J., Wzorek, M., Głodek-Bucyk, E., Zalimidis, P. (2025). Numerical simulation of co-combustion of solid recovered fuel in cement kiln installation. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 13(3), 1-19. DOI: <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d13.0578>
- Cheng, K., Hao, W., Wang, Y., Yi, P., Zhang, J., Ji, W. (2020). Understanding the emission pattern and source contribution of hazardous air pollutants from open burning of municipal solid waste in China. *Environmental Pollution*, 263, 114417. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.114417](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114417)
- Chiou, I.-J., Chen, C.-H. (2021). Municipal solid waste landfill age and refuse-derived fuel. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 39(4), 601-606. DOI: [10.1177/0734242X20961832](https://doi.org/10.1177/0734242X20961832)
- Damanhuri, E., Padmi, T. (2010). Handbook of solid waste management. Bandung: Institute Technology Bandung. 2010.
- Dong, T. T. T., Lee, B.-K. (2009). Analysis of potential RDF resources from solid waste and their energy values in the largest industrial city of Korea. *Waste Management*, 29(5), 1725-1731. DOI: [10.1016/j.wasman.2008.11.022](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.022)

- Fadhil, M. F., Cundaningsih, N. (2025). Emisi karbon dari pengelolaan sampah: Studi kasus UPN Veteran Jawa Timur. *Environmental Engineering Journal ITATS*, 5(2), 118-125. DOI: <https://doi.org/10.31284/j.envitats.2025.v5i2.8156>
- Faruqi, H. M. A., Ainun, S. (2024). Kajian potensi pemanfaatan sampah sebagai bahan baku alternatif Refuse Derived Fuel: Studi Literatur. *FTSP Series: Seminar Nasional dan Diseminasi Tugas Akhir* 2024, 895-900.
- Fierro Rivas, M. A., Westermeier, M., Schiffler, C., Spliethoff, H. (2026). Stochastic Characterization of Municipal Solid Waste Properties for Thermochemical Applications. *Waste Management*, 226, 115799. DOI: [10.1016/j.wasman.2026.115799](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2026.115799)
- Fozer, D., Owsianiak, M., Hauschild, M. Z. (2025). Prospective life cycle assessment of solid recovered fuel utilization and marine fuel production in cement plants. *Sustainable Production and Consumption*, 55, 117-131. DOI: [10.1016/j.spc.2025.02.012](https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.02.012)
- Gendebien, A., Leavens, A., Blackmore, K., Godley, A., Lewin, K., Whiting, K. J., Davis, R. (2003). Refuse derived fuel, current practice and perspectives. Final Report. WRc Ref: C05087-4. European Commission – Directorate General Environment.
- Gerassimidou, S., Velis, C. A., Williams, P. T., Castaldi, M. J. Black, L., Komilis, D. (2021). Chlorine in waste-derived Solid Recovered Fuel (SRF), co-combusted in cement kilns: A systematic review of sources, reactions, fate and implications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(2), 140-186. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1717298>
- Gidakos, E., Havas, G., Ntzamilis, P. (2006). Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete. *Waste Management*, 26(6), 668-679. DOI: [10.1016/j.wasman.2005.07.018](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.07.018)
- Günkaya, Z., Özkan, M., Özkan, K., Bekgöz, B. O., Yorulmaz, Ö., Özkan, A., Banar, M. (2023). Prediction of the proximate analysis parameters of refuse-derived fuel based on deep learning approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(7), 17327-17341. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23272-6>
- Indonesia Government Rules. Indonesia Government Rules No. 81/2012 about Management of Residential Solid Waste and Non-Residential Solid Waste. 2012.
- Ismawati, Y., Proboretno, N., Septiono, M. A., Zaki, K. (2022). Refuse-Derived Fuel in Indonesia. Nexus3 Foundation/IPEN. Denpasar.
- Iyamu, H. O., Anda, M., Ho, G. (2020). A review of municipal solid waste management in the BRIC and high-income countries: A thematic framework for low-income countries. *Habitat International*, 95, 102097. DOI: [10.1016/j.habitatint.2019.102097](https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.102097)
- Izaty, F. N., Putra, H. P., Lokahita, B. (2018). Analisis komposisi dan identifikasi potensi RDF (*Refuse-Derived Fuel*) pada sampah zona 1 TPA Piyungan Bantul dengan analisis *proximate* dan nilai kalor. Tugas Akhir. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2021). Standar Mutu Refuse Derived Fuel. Kementerian ESDM. Jakarta.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2023). Petunjuk Teknis Pelaksanaan Kegiatan Tempat Pengolahan Sampah Reduce Reuse Recycle (TPS 3R) TA 2023. Kementerian PUPR. Jakarta.
- Kuspangaliyeva, B., Suleimenova, B., Shah, D., Sarbassov, Y. (2021). Thermogravimetric study of refuse derived fuel produced from municipal solid waste of Kazakhstan. *Applied Sciences*, 11(3), 1219. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11031219>
- Kusuma, M. A., Nassour, A., Nelles, M. (2024). MSW-to-RDF conversion for cement plant in Indonesia through pilot project and modeling. *Detritus*, 28, 84-96. DOI: [10.31025/2611-4135/2024.19399](https://doi.org/10.31025/2611-4135/2024.19399)
- Liu, T., Wen, C., Wang, D., Liu, F., Huang, L., Yu, X. (2025). PM10 formation behaviors from combustion of municipal solid waste and refuse-derived fuel: Insight into volatile-char interactions. *Fuel*, 399, 135564. DOI: [10.1016/j.fuel.2025.135564](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135564)
- Lokahita, B., Damanhuri, E. (2013). Potensi sampah combustibile pada titik transfer di Kota Bandung untuk bahan baku Refused Derived Fuel (RDF). Program Studi Teknik Lingkungan FTSL ITB. Bandung

- Luqman, L., Madenda, S., Prihandoko, P. (2023). Polynomial regression model utilization to determine potential Refuse-Derived Fuel (RDF) calories in Indonesia. *Energies*, 16(20), 7200. <https://doi.org/10.3390/en16207200>
- Mondal, S., Rafizul, I. M. (2025). Predicting calorific value through proximate analysis of municipal solid waste using soft computing system. *Discover Applied Sciences*, 7(3), 212. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06643-9>
- Nithikul, J. (2007). Potential of refuse derived fuel production from bangkok municipal solid waste. Thesis, Asian Institute of Technology, School of Environment, Resources and Development, Thailand.
- Novita, D. M., Damanhuri, E. (2010). Perhitungan nilai kalor berdasarkan komposisi dan karakteristik sampah perkotaan di Indonesia dalam konsep waste to energy. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 16(2), 103-114. DOI: [10.5614/JTL.2010.16.2.1](https://doi.org/10.5614/JTL.2010.16.2.1)
- Nowak, M. (2023). Features of refuse derived fuel in Poland: Physicochemical properties and availability of refuse derived fuel. *Journal of Ecological Engineering*, 24(3), 1-9. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/157159>
- Rahotharn, U., Khemkhao, M., Kaewpengkrow, P. R. (2023). Solid waste management by RDF production from landfilled waste to renewable fuel of Nonthaburi. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(5), 968-976. DOI: <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.52956>
- Rezaei, H., Yazdanpanah, F., Lim, C. J., Sokhansanj, S. (2021). Pelletization properties of refuse-derived fuel: Effects of particle size and moisture content. *Fuel Processing Technology*, 205, 106437. DOI: [10.1016/j.fuproc.2020.106437](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106437)
- Sakti, R. D. S. (2022). Peran tempat pengolahan sampah 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*) dalam mengurangi pengangkutan sampah TPA di Kawasan Kabupaten Sleman. *Environmental Engineering Journal ITATS*, 2(2), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.31284/j.envitats.2022.v2i2.3736>
- Salaripoor, H., Yousefi, H., Abdoos, M. (2025). Life cycle environmental assessment of Refuse-Derived Fuel (RDF) as an alternative to fossil fuels in cement production: A sustainable approach for mitigating carbon emissions. *Fuel Communications*, 22, 100135. DOI: [10.1016/j.jfueco.2025.100135](https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2025.100135)
- Sari, A. J. (2012). Potensi sampah TPA Cipayung sebagai bahan baku Refuse Derived Fuel (RDF). Skripsi, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok.
- Sharma, P., Sheth, P. N., Mohapatra, B. N. (2022). Recent progress in refuse derived fuel (RDF) co-processing in cement production: Direct firing in kiln/calcliner vs process integration of RDF gasification. *Waste and Biomass Valorization*, 13(11), 4347-4374. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01840-8>
- Simbolon, W. A., Winaya, I. N. S., Darma, I. W. A., Tenaya, I. G. N. P. (2025). Pengaruh komposisi dan kadar air sampah terhadap karakteristik Refuse Derived Fuel (RDF) Municipal Solid Waste (MSW). *Jurnal Ilmiah Teknik Desain Mekanika*, 14(2), 140-144.
- Świechowski, K., Syguła, E., Koziel, J. A., Stępień, P., Kugler, S., Manczarski, P. (2020). Low-temperature pyrolysis of municipal solid waste components and refuse-derived fuel — process efficiency and fuel properties of carbonized solid fuel. *Data*, 5(2), 48. DOI: <https://doi.org/10.3390/data5020048>
- Syguła, E., Świechowski, K., Stępień, P., Koziel, J. A., Białowiec, A. (2021). The prediction of calorific value of carbonized solid fuel produced from refuse-derived fuel in the low-temperature pyrolysis in CO₂. *Materials*, 14(1), 49. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14010049>
- Tahir, J., Tian, Z., Ahmad, R., Martinez, P. (2023). Refuse-derived fuel-3 production simulation using network flow modeling: Predicting the uncertainty in quality standards. *Fuel*, 345, 128168. DOI: [10.1016/j.fuel.2023.128168](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128168)
- Triyono, B., Prawisudha, P., Aziz, M., Mardiyati, Pasek, A. D., Yoshikawa, K. (2019). Utilization of mixed organic-plastic municipal solid waste as renewable solid fuel employing wet torrefaction. *Waste Management*, 95, 1-9. DOI: [10.1016/j.wasman.2019.05.055](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.055)
- Trombley, J. B., Wang, C., Thennadil, S. N. (2023). Model-free measurements of calorific content and ash content of mixed garden wastes using a bomb calorimeter. *Fuel*, 352, 129105. DOI: [10.1016/j.fuel.2023.129105](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129105)

- Tumuluru, J. S., Yancey, N. A. Kane, J. J. (2021). Pilot-scale grinding and briquetting studies on variable moisture content municipal solid waste bales: Impact on physical properties, chemical composition, and calorific value. *Waste Management*, 125, 316-327. DOI: [10.1016/j.wasman.2021.02.013](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.013)
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah. Sekretariat Negara. Jakarta.
- Viczek, S. A., Lorber, K. E., Pomberger, R., Sarc, R. (2021). Production of contaminant-depleted solid recovered fuel from mixed commercial waste for co-processing in the cement industry. *Fuel*, 294, 120414. DOI: [10.1016/j.fuel.2021.120414](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120414)
- Wulandari, N., Arifin, A., Asbanu, G. C. (2023). Utilization of organic and plastic waste as solid fuel for steam power plants 3 parit baru site Bengkayang. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 21(2), 390-403. DOI: <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v21i2.390-403>
- Xia, H., Tang, J., Aljerf, L. (2022). Dioxin emission prediction based on improved deep forest regression for municipal solid waste incineration process. *Chemosphere*, 294, 133716. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2022.133716](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133716)
- Zaman, B., Samadikun, B. P., Hardyanti, N., Purwono, P. (2021). Waste to energy: Calorific improvement of municipal solid waste through biodrying. *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), 176-187. DOI: [10.2478/rtuect-2021-0012](https://doi.org/10.2478/rtuect-2021-0012)