Journal of Innovative and Creativity
Journal Homepage: https://joecy.org/index.php/joecy
e-mail: journaljoecy@gmail.com

Faculty of Education
University of Pahlawan Tuanku Tambusai
ISSN 2775-771X (Online)
ISSN 2962-570X (Printed)
6 (1) 2026, Page: 5765-5773

Kajian Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Turbin Uap Terintegrasi Rotary Dryer Dengan Pemanfaatan Sampah Campuran Di TPA Toisapu Kota Ambon: Analisis Termodinamika Dan Eksergi

Gomgom T. Pangaribuan, S.Pd.,M.T[1] dan Fhandy Pandey , S.Si., M.T[2]
Politeknik Negeri Ambon
Corresponding Author Gomgom T.P, E-Mail: gom2pang@gmail.com

Published: Januari 2026

ABSTRACT

Kota Ambon menghadapi permasalahan serius dalam pengelolaan sampah, di mana timbunan harian sekitar 246,74 ton melebihi kapasitas pengangkutan sebesar 185,5 ton sehingga terjadi penumpukan di beberaopa sudut kota dan TPA Toisapu dengan karakteristik sampah campuran berkadar air tinggi (sekitar 55%). Kondisi ini menurunkan nilai kalor efektif (LHV), menyebabkan pembakaran kurang stabil, dan menjadikan kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) kurang efisien. Penelitian ini mengkaji sistem PLTSa konfigurasi turbin uap konvensional dengan konfigurasi terintegrasi rotary dryer, di mana uap panas keluaran turbin (170°C, 8 bar) dimanfaatkan sebagai media pengering sekaligus pengkondensasi untuk menurunkan kadar air sampah dari 55% menjadi 12% sebelum pembakaran. Analisis termodinamika dan eksergi dilakukan untuk laju alir sampah 2,1 kg/s dengan kondisi operasi sebagaimana guna membandingkan kinerja kedua sistem PLTSa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses pengeringan meningkatkan LHV dari 3,26 MJ/kg menjadi 7,55 MJ/kg, menaikkan daya listrik netto dari sekitar 0,60 MW menjadi 0,943 MW, serta meningkatkan efisiensi termal dari 8,8% menjadi 10,6% dan efisiensi eksergi dari 7,5% menjadi 10,1%. Analisis eksergi mengidentifikasi boiler sebagai sumber utama destruksi eksergi (sekitar 6,158 MW atau 66,7% dari total 9,232 MW), diikuti oleh rotary dryer dan turbin, sementara kontribusi pompa sangat kecil. Secara keseluruhan, konsep integrasi rotary dryer ini secara signifikan meningkatkan pemanfaatan energi dan eksergi dari sampah campuran serta mendukung pengelolaan sampah dan energi yang lebih berkelanjutan di wilayah pesisir seperti Ambon.

Keywords: sampah campuran, PLTSa, Rotary Dryer, Analisis Termodinamika, Analisis Eksergi.

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Atibution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

PENDAHULUAN

Kota Ambon sebagai pusat aktivitas ekonomi, di mana sebagian besar aktivitas domestik dan komersial yang intens berada di titik-titik krusial sepanjang pesisir Teluk Ambon sebagai ikon geografis kini menghadapi ancaman serius dari polusi sampah padat. Kondisi ini diperparah oleh pola aliran sampah yang masif dari daratan melalui sungai-sungai yang bermuara di teluk, akumulasi sampah dari kegiatan masyarakat dan sektor usaha di sepanjang pesisir ini menjadikan Teluk Ambon sebagai titik kumpul limbah yang mengancam ekosistem perairan. Karakteristik sampah campuran seperti dari pesisir dan wilayah daratan umumnya memiliki kadar air (Moisture Content/MC) tinggi, berkisar 50-60% bahkan dapat meningkat pada musim hujan. Kondisi ini sangat menentukan kelayakan pemanfaatan sampah sebagai bahan bakar pada Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa), karena kadar air berbanding terbalik dengan nilai kalor efektif (Lower Heating Value/LHV). Secara termodinamika, energi pembakaran pada sampah panas banyak terserap untuk menguapkan air sehingga menurunkan suhu pembakaran, memperlemah stabilitas nyala api, dan meningkatkan potensi pembakaran tidak sempurna. Hubungan antara MC dan LHV dapat diperkirakan melalui korelasi LHV sampah panas menggunakan rumus:

$$LHV_{wet} = LHV_{dry}\ x\ (1 - MC) - MC\ x\ h_{fg} \quad \text{(Pers. 1)}$$

yang menunjukkan bahwa semakin tinggi MC maka LHV_{wet} semakin rendah. Peningkatan LHV berarti peningkatan mutu bahan bakar yang berimplikasi langsung pada kinerja boiler, produksi uap, serta efisiensi sistem pembangkit. Konversi energi sampah menjadi listrik pada PLTSa umumnya menggunakan siklus Rankine berbasis turbin uap.

Untuk menjawab kendala sampah berkadar air tinggi sekaligus memanfaatkan energi buang secara lebih bernilai, penelitian ini mengkaji PLTSa turbin uap terintegrasi rotary dryer tanpa kondensor terpisah dengan dua konfigurasi : (1) sistem konvensional tanpa rotary dryer (dengan kondensor) dan (2) sistem terintegrasi dengan rotary dryer (rotary dryer sebagai pengering sekaligus kondensor).

Prinsip kerja rotary dryer dalam sistem termodinamika ini didasarkan pada mekanisme pengeringan kontinyu menggunakan drum berputar yang memanfaatkan gaya sentrifugal untuk menggerakkan sampah panas sepanjang drum dengan kemiringan tertentu. Media pemanas berupa uap panas keluar turbin dialirkan melalui heat exchanger di dalam drum, dimana terjadi perpindahan panas dan massa secara simultan. Proses termodinamika yang terjadi meliputi: (1) perpindahan panas konveksi dari uap panas ke permukaan sampah melalui dinding heat exchanger, (2) perpindahan massa berupa penguapan air dari sampah yang memerlukan energi laten penguapan,dan (3) kondensasi uap panas menjadi air hangat sambil melepas kalor kondensasi untuk pengeringan.

Perbandingan analisis termodinamika (Hukum I) dan eksergi (Hukum II) antara kedua konfigurasi dilakukan menggunakan rumus-rumus utama berikut. Untuk analisis energi (Hukum I), untuk menghitung input energi ke boiler; digunakan rumus:

$$Q_{in} = \dot{m}_{sampah}\ x\ LHV_{wet} \quad \text{(Pers. 2}$$

untuk menghitung daya listrik netto; dan untuk menghitung efisiensi termal sistem.

$$W_{net} = \left(W_{turbin} - W_{pompa}\right) x\ W_{generator} \quad \text{(Pers. 3)}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad \text{(Pers. 4)}$$

Untuk analisis eksergi (Hukum II), digunakan rumus: untuk menghitung eksergi sampah (fuel exergy), dimana ϕ = 1,05 adalah faktor eksergi bahan bakar padat; dan

$$E_{x,sampah} = m_{sampah}\ x\ LHV_{net} \quad \text{(Pers. 5)}$$

untuk menghitung efisiensi eksergi sistem.

$$\eta_{ex} = \frac{W_{net}}{E_{x,sampah}} \quad \text{(Pers. 6)}$$

Kajian konfigurasi tersebut memerlukan analisis termodinamika dan eksergi. Analisis energi (Hukum I) digunakan untuk menyusun neraca massa energi, menghitung kerja turbin dan konsumsi pompa, serta menentukan efisiensi termal sistem. Namun, karena energi tidak merepresentasikan kualitas, diperlukan analisis eksergi (Hukum II) untuk menghitung eksergi aliran pada setiap state point, menentukan destruksi eksergi pada setiap komponen serta mengidentifikasi lokasi irreversibilitas terbesar sebagai dasar optimasi.

METODE PENELITIAN

Waktu dan tempat

Penelitian ini merupakan kajian analisis termodinamika dan eksergi terhadap kajian sistem PLTSa turbin uap terintegrasi rotary dryer dengan kajian sampah campuran di TPA Toisapu Kota Ambon. Penelitian dilaksanakan secara desk study melalui tahapan: studi literatur, penetapan parameter analisis, pemodelan siklus, perhitungan neraca massa–energi–eksergi, analisis perbandingan konfigurasi, dan penyusunan pembahasan. Data yang digunakan adalah data asumsi yang dijustifikasi berdasarkan karakteristik sampah pesisir Indonesia dan referensi teknis pembangkit uap.

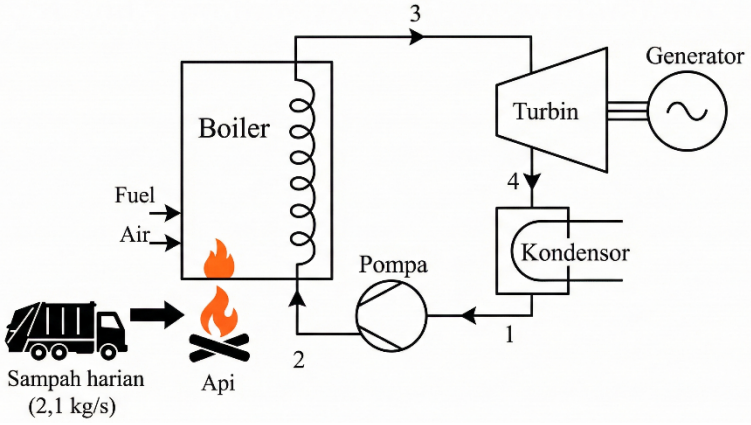
Materi penelitian

Materi penelitian berupa model sistem PLTSa berbasis siklus Rankine yang terdiri atas rotary dryer, pompa 1, pompa 2, boiler/incinerator, turbin uap, dan generator. Data input utama meliputi: laju alir sampah 2,1 kg/s, kadar air awal 55% dan akhir 12%, LHV sampah panas dan kering, tekanan dan

suhu operasi boiler (40 bar, 400°C), kondisi keluar turbin (8 bar, 170°C), serta kondisi referensi lingkungan Ambon (T_0 = 27,5°C; P_0 = 1,01325 bar).

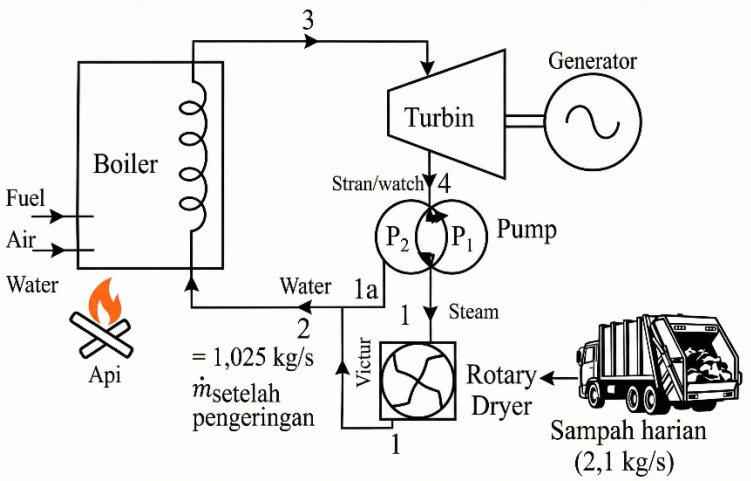
Rancangan penelitian

Penelitian ini menggunakan rancangan komparatif dua konfigurasi, yaitu: (1) sistem PLTSa konvensional dan (2) sistem PLTSa terintegrasi rotary dryer.



Gambar 1. Konigurasi PLTSa sistem konvensional

Pada konfigurasi terintegrasi, rotary dryer berfungsi ganda sebagai pengering dan kondensor. Konsep siklusnya adalah: uap panas lanjut dari boiler diekspansikan di turbin (state 3-4) hingga menjadi uap panas. Uap panas keluar turbin kemudian dialirkan menuju rotary dryer (state 1-2) sebagai media pemanas, sehingga dengan gaya sentrifugal rotary dryer, uap tersebut melepas panas kondensasi untuk mengeringkan sampah dan sekaligus terkondensasi menjadi air hangat. Air panas hasil kondensasi dipompa kembali sebagai air umpan boiler (state 4a-1a), kemudian dipanaskan di boiler menjadi uap panas lanjut (state 1a-3), dan siklus berulang. Alur tertutup rotary dryer secara teoritis memungkinkan peningkatan efisiensi karena panas kondensasi yang pada sistem konvensional terbuang dapat dialihkan menjadi energi berguna untuk peningkatan mutu bahan bakar.



Gambar 2. Konigurasi PLTSa sistem terintegrasi rotary dryer

Parameter dan analisis data

Parameter yang dianalisis meliputi: LHV sampah sebagai fungsi kadar air, neraca massa dan energi tiap komponen, kerja turbin (Wturbin) dan pompa (Wpompa), daya listrik netto, efisiensi termal sistem (ηth), eksergi spesifik dan eksergi aliran pada setiap state point, destruksi eksergi ($\dot{E}_{x,dest}$) pada boiler, turbin, rotary dryer, dan pompa, serta efisiensi eksergi sistem (ηex). Perhitungan dilakukan menggunakan persamaan neraca massa–energi–eksergi yang kemudian dibandingkan antar konfigurasi untuk menilai pengaruh integrasi rotary dryer terhadap peningkatan LHV, daya listrik, efisiensi termal, efisiensi eksergi, dan distribusi destruksi eksergi, serta diinterpretasikan secara kualitatif dan kuantitatif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Data Analisis Sistem PLTSa Terintegrasi Rotary Dryer

Analisis termodinamika dan eksergi pada penelitian ini dilakukan berdasarkan data asumsi yang telah disinkronkan dengan karakteristik sampah campuran di TPA Toisapu Kota Ambon dan kondisi operasi komponen utama sistem PLTSa. Laju alir massa sampah ditetapkan sebesar 2,1 kg/s, yang ekuivalen dengan 185,5 ton/hari atau 7,729 ton/jam. Kadar air awal sampah (MCawal) sebesar 55% mencerminkan karakteristik sampah pesisir yang panas, sedangkan kadar air akhir (MCakhir) setelah pengeringan ditargetkan 12%. Boiler dioperasikan pada tekanan 40 bar dan suhu 400°C sehingga menghasilkan uap panas lanjut (superheated steam), sementara turbin uap dirancang bekerja dari 40 bar, 400°C hingga tekanan keluaran 8 bar dan suhu sekitar 170°C (uap panas). Kondisi referensi lingkungan Ambon diambil T_0 = 27,5°C (300,65 K) dan P_0 = 1,01325 bar.

Efisiensi komponen yang digunakan dalam analisis adalah efisiensi tipikal industri: efisiensi boiler 70% untuk sampah kering, efisiensi isentropik turbin 80% dengan efisiensi mekanis 97%, efisiensi generator 95%, efisiensi pompa 75%, serta efisiensi pengeringan rotary dryer sekitar 60%. Dengan basis data ini, dilakukan perhitungan bertahap terhadap neraca massa, neraca energi, dan neraca eksergi untuk dua konfigurasi sistem.

Pengaruh Pengeringan terhadap Nilai Kalor dan Input Energi Sistem

Langkah pertama dalam menganalisis kinerja sistem adalah mengkaji pengaruh pengeringan terhadap nilai kalor (LHV) sampah. Berdasarkan hubungan teoritis antara LHV dry, kadar air (MC), dan entalpi penguapan air, diperoleh bahwa untuk MC 55% dengan LHV kering 10 MJ/kg, LHV sampah panas turun menjadi sekitar 3,26 MJ/kg. Setelah pengeringan hingga MC 12%, LHV meningkat menjadi sekitar 8,53 MJ/kg. Dengan demikian, pengeringan menghasilkan peningkatan LHV sebesar 2,62 kali lipat.

Peningkatan nilai kalor ini secara langsung berdampak pada besarnya energi yang dapat dimasukkan ke dalam boiler. Untuk laju alir sampah 2,1 kg/s, input energi sampah panas pada MC 55% adalah sekitar 6,846 MW (2,1 kg/s × 3,26 MJ/kg), sedangkan setelah dikeringkan hingga MC 12% dan dengan massa sampah ke boiler sekitar 1,075 kg/s, input energi meningkat menjadi sekitar 9,170 MW (1,075 kg/s × 8,53 MJ/kg). Menariknya, meskipun massa sampah yang masuk ke boiler berkurang akibat penghilangan air, peningkatan LHV yang signifikan membuat total input energi justru naik sekitar 33,9%. Hal ini menjadi salah satu alasan utama mengapa integrasi rotary dryer berpotensi meningkatkan daya listrik dan efisiensi sistem.

Produksi Uap dan Kerja Turbin pada Sistem Terintegrasi

Dengan efisiensi boiler 70%, energi yang benar-benar ditransfer ke uap (Quap) pada sistem dengan rotary dryer adalah sekitar 6,419 MW dari total 9,170 MW input energi sampah. Berdasarkan beda entalpi antara air umpan (State 1a) dan uap panas lanjut (State 3), yaitu $h_3 - h_{1a}$ = 419,1 - 3213,6 kJ/kg, diperoleh laju alir uap sekitar 2,298 kg/s. Nilai ini konsisten digunakan dalam seluruh perhitungan turbin dan rotary dryer.

Kerja turbin dihitung dari beda entalpi antara uap masuk dan uap keluar turbin ($h_3 - h_4$). Dengan entalpi uap masuk 3213,6 kJ/kg dan entalpi uap keluar 2825 kJ/kg, serta laju alir uap 2,298 kg/s, efisiensi isentropik 80%, dan efisiensi mekanik 97%, kerja turbin yang dihasilkan adalah 866,8 kW. Kontribusi kerja pompa 1 dan pompa 2 relatif kecil dibanding kerja turbin, bahkan kerja pompa 2 praktis dapat diabaikan karena tekanan dan suhu state 4a–1a diasumsikan sama (1,5 bar, 100°C). Akibatnya, daya listrik netto yang dihasilkan setelah dikalikan efisiensi generator (95%) adalah sekitar 0,945 MW sedangkan sistem PLTSa konvensional hanya menghasilkan daya listrik sekitar 0,609 MW.

Efisiensi Termal Sistem (Analisis Hukum I Termodinamika)

Efisiensi termal sistem (ηth) didefinisikan sebagai rasio antara daya listrik netto terhadap input energi bahan bakar. Untuk sistem konvensional, efisiensi termal berkisar 8,8%, dengan daya listrik sekitar 0,603 MW dari input energi sekitar 6,846 MW. Setelah integrasi rotary dryer dan peningkatan LHV, efisiensi termal meningkat menjadi sekitar 10,6%, dengan daya listrik 0,945 MW dari input energi 9,170 MW. Peningkatan efisiensi termal ini sekitar 17 %, sedangkan peningkatan daya listrik mencapai sekitar 56,8%.

Perbedaan persen peningkatan antara daya listrik dan efisiensi termal menunjukkan bahwa pengeringan tidak hanya menambah energi yang tersedia, tetapi juga memperbaiki cara energi itu dikonversi menjadi kerja. Peningkatan efisiensi termal berarti proporsi energi sampah yang berhasil diubah menjadi listrik menjadi lebih besar. Dari sudut pandang Hukum I, integrasi rotary dryer terbukti memberikan keuntungan signifikan untuk sistem PLTSa di TPA Toisapu.

Analisis Eksergi dan Destruksi Eksergi per Komponen

Analisis eksergi memberikan pandangan yang lebih dalam terhadap kualitas energi dan irreversibilitas proses. Eksergi sampah kering (fuel exergy) dihitung dengan mengalikan LHV dengan faktor koreksi eksergi bahan bakar padat ($\phi \approx 1{,}05$). Untuk massa sampah kering 1,075 kg/s dan LHV 8,53 MJ/kg, diperoleh eksergi sampah sekitar 9,625 MW. Efisiensi eksergi sistem kemudian didefinisikan sebagai rasio antara daya listrik netto dengan eksergi sampah, yaitu sekitar 0,943 MW / 9,358 MW = 10,1%. Konfigurasi tanpa rotary dryer hanya mencapai efisiensi eksergi sekitar 7,5% (0,075), sehingga integrasi rotary dryer memberikan peningkatan efisiensi eksergi sekitar 30,7%.

Distribusi destruksi eksergi per komponen menunjukkan bahwa boiler merupakan sumber utama pemusnahan eksergi dengan nilai sekitar 6,02 MW atau 65,6% dari total destruksi eksergi sistem yang mencapai 9,18 MW. Rotary dryer menyumbang sekitar 0,86 MW (9,4%), turbin sekitar 0,21 MW (2,3%), sedangkan pompa 1 dan pompa 2 memberikan kontribusi yang sangat kecil (mendekati nol). Dominasi destruksi eksergi di boiler dapat dijelaskan oleh sifat proses pembakaran dan perpindahan panas yang sangat irreversibel, terutama ketika perbedaan suhu antara gas hasil pembakaran dan air umpan sangat besar.

Meskipun rotary dryer menambah satu sumber irreversibilitas baru dalam sistem, nilai destruksi ekserginya masih jauh lebih kecil dibanding boiler. Yang lebih penting, manfaat peningkatan nilai kalor sampah dan pemanfaatan eksergi uap panas untuk pengeringan jauh melebihi tambahan destruksi eksergi ini, sehingga secara keseluruhan efisiensi eksergi sistem tetap meningkat.

Pemanfaatan Uap Panas Keluar Turbin untuk Pengeringan

Salah satu aspek kunci dalam konfigurasi yang dikaji adalah pemanfaatan uap panas keluar turbin sebagai media pengering sekaligus media kondensasi di rotary dryer. Dalam sistem konvensional, uap panas keluar turbin biasanya dialirkan ke kondensor, didinginkan hingga membentuk air kondensat pada suhu mendekati suhu lingkungan, dan panas yang dilepas sebagian besar hilang ke lingkungan. Pada sistem terintegrasi, uap panas tersebut dimanfaatkan untuk mengeringkan sampah sehingga panas kondensasinya digunakan secara produktif.

Perhitungan menunjukkan bahwa eksergi uap panas yang digunakan untuk pengeringan sebesar 2,025 MW, sedangkan manfaat eksergi dari peningkatan LHV sampah (selisih eksergi bahan bakar antara sampah kering dan sampah panas) adalah 2,436 MW (9,625 - 7,189 MW). Rasio efektivitas pemanfaatan eksergi menunjukkan bahwa setiap unit eksergi uap panas yang dialokasikan ke rotary dryer menghasilkan manfaat eksergi dalam bentuk peningkatan mutu bahan bakar. Nilai rasio yang tinggi ini menegaskan bahwa integrasi rotary dryer dengan memanfaatkan uap panas keluar turbin merupakan langkah yang sangat efektif, bukan hanya dari sisi energi tetapi juga dari sisi kualitas energi (eksergi).

Integrasi Rotary Dryer dan Perbandingan Kinerja Sistem

Jika dilihat secara komprehensif, integrasi rotary dryer membawa beberapa dampak utama terhadap sistem PLTSa di TPA Toisapu. Pertama, dari sisi bahan bakar, kadar air sampah turun menjadi 12%, sehingga LHV meningkat dari 3,26 MJ/kg menjadi 8,53 MJ/kg. Kedua, meskipun massa sampah ke boiler berkurang dari 2,1 kg/s menjadi 1,075 kg/s, total input energi justru meningkat dari 6,846 MW menjadi 9,170 MW (sekitar 33,9%) karena LHV yang lebih tinggi. Ketiga, daya listrik netto meningkat dari 0,603 MW menjadi 0,945 MW (sekitar 56,8%). Keempat, efisiensi termal meningkat dari 8,8% menjadi 10,3%, sedangkan efisiensi eksergi meningkat dari 7,5% menjadi 9,8%. Perbandingan detail kalor pembakaran sebelum pengeringan (MC 55%) dan setelah pengeringan (MC 12%).

Dari sudut pandang distribusi destruksi eksergi, integrasi rotary dryer menggeser sebagian irreversibilitas dari kondensor konvensional ke rotary dryer, namun sekaligus menurunkan destruksi eksergi efektif di boiler karena bahan bakar yang masuk memiliki mutu lebih baik. Secara relatif, boiler

tetap menjadi komponen dengan destruksi eksergi terbesar sehingga menjadi target utama untuk strategi optimasi lebih lanjut, misalnya melalui perbaikan desain ruang bakar, peningkatan kualitas pencampuran udara+bahan bakar, dan pengendalian suhu pembakaran.

Pembahasan Komprehensif dan Implikasi Praktis

Tabel 1. Parameter karakteristik sistem Konvensional vs sistem Terintegrasi Rotary dryer

Parameter	Sistem Konvensional	Sistem Terintegrasi	Perubahan
Massa sampah ke boiler	2,1 kg/s	1,075 kg/s	-48,9%
MC sampah ke boiler	55%	12%	-43%
LHV sampah	3,26 MJ/kg	8,53 MJ/kg	+162%
Input energi (Qin)	6,846 MW	9,170 MW	+33,9%
Laju alir uap	1,573 kg/s	2,298 kg/s	+46,2%
Tekanan keluar turbin	0,15 bar	5 bar	Back-pressure
Daya listrik netto	0,603 MW	0,945 MW	+56,8%
Efisiensi termal	8,8%	10,3%	+17,0%

Hasil analisis (Table 1) menunjukkan bahwa untuk konteks sampah campuran berkadar air tinggi di TPA Toisapu, integrasi rotary dryer dalam siklus PLTSa turbin uap memberikan keuntungan ganda: meningkatkan mutu bahan bakar dan memanfaatkan eksergi uap buang secara lebih optimal. Peningkatan LHV dan efisiensi termal–eksergi menegaskan bahwa peran rotary dryer bukan sekadar "beban tambahan" dalam sistem, tetapi "unit penguat kinerja" yang mengubah konfigurasi siklus menjadi lebih efisien.

Dari sisi perencanaan dan desain, hasil ini mengindikasikan bahwa untuk wilayah dengan karakteristik sampah basah seperti pesisir Ambon, pengeringan termal terintegrasi sebaiknya dipertimbangkan sejak tahap awal desain PLTSa, bukan sebagai tambahan belakangan. Penentuan kapasitas rotary dryer, konfigurasi aliran uap, dan strategi kontrol kadar air menjadi faktor kunci agar sistem dapat beroperasi stabil. Selain itu, meskipun penelitian ini masih berbasis data asumsi, pola distribusi energi dan eksergi yang diperoleh dapat menjadi dasar awal untuk kajian kelayakan teknis dan ekonomi yang lebih rinci, termasuk analisis investasi, biaya operasi, dan manfaat lingkungan.

Secara keseluruhan, analisis termodinamika dan eksergi yang dilakukan dalam penelitian ini memperkuat argumen bahwa pengembangan PLTSa turbin uap terintegrasi rotary dryer di TPA Toisapu Kota Ambon berpotensi menjadi salah satu solusi strategis untuk mengatasi permasalahan sampah perkotaan sekaligus meningkatkan kontribusi energi terbarukan. Sebelum pengolahan dalam ruang pembakaran boiler, perlu dilakukan pemisahan sampah secara sistematis sesuai dengan prinsip circular economy untuk mengurangi volume sampah yang masuk ke boiler dan memaksimalkan pemanfaatan nilai tambah ekonomi dari setiap fraksi. Fraksi organik diolah melalui biodigester anaerobik untuk menghasilkan biogas dan slurry-pupuk organik, sementara fraksi plastik dapat dimanfaatkan menjadi produk bernilai ekonomi seperti kerajinan tangan atau diolah melalui pirolisis untuk menghasilkan produk energi (sintetik oil, gas, char). Dengan pendekatan terintegrasi yang mengkombinasikan biodigester anaerobik, pirolisis, dan konversi energi melalui PLTSa, sistem ini berfungsi sebagai pusat pengolahan sampah terpadu yang memaksimalkan nilai tambah ekonomi dari setiap komponen sampah melalui prinsip circular economy, sehingga mengurangi volume sampah.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dengan kajian sistem PLTSa turbin uap terintegrasi rotary dryer menggunakan analisis termodinamika dan eksergi di TPA Toisapu Kota Ambon, dapat disimpulkan bahwa integrasi pengeringan memberikan peningkatan kinerja sistem yang nyata pada konteks sampah campuran berkadar air tinggi. Penurunan kadar air sampah dari MC 55% menjadi 12% meningkatkan nilai kalor efektif (LHV) dari 3,26 MJ/kg menjadi 8,53 MJ/kg (naik 2,62 kali). Bahwa efektivitas pengeringan meskipun massa sampah yang dibakar di boiler berkurang dari 2,1 kg/s menjadi 1,075 kg/s (penurunan 48,9%), namun kalor pembakaran (input energi) justru meningkat dari 6,846 MW menjadi 9,170 MW (peningkatan 33,9%). Hal ini terjadi karena peningkatan LHV sebesar 162% lebih besar daripada penurunan massa, sehingga menghasilkan input energi yang lebih tinggi. Dampaknya,

daya listrik netto meningkat dari sekitar 0,603 MW menjadi sekitar 0,945 MW (+56,8%), efisiensi termal meningkat dari 8,8% menjadi 10,3% (+17,0%), dan efisiensi eksergi meningkat dari 7,5% menjadi 9,8% (+30,7%). Analisis eksergi menunjukkan bahwa boiler merupakan sumber destruksi eksergi terbesar (sekitar 6,02 MW atau 65,6% dari total destruksi eksergi sistem 9,18 MW), diikuti rotary dryer (0,86 MW atau 9,4%) dan turbin (0,21 MW atau 2,3%). Secara keseluruhan, konfigurasi siklus tertutup turbin-rotary dryer-boiler berpotensi menjadi solusi PLTSa yang lebih efisien dan relevan untuk wilayah pesisir seperti kota Ambon dengan karakteristik sampah campuran berkadar air tinggi.

REFERENCES

Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. Waste Management, 32(4), 625-639. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.016

ASME. (2004). ASME PTC 6-2004: Steam Turbines. New York: American Society of Mechanical Engineers.

ASME. (2010). ASME PTC 4-2013: Fired Steam Generators. New York: American Society of Mechanical Engineers.

Bejan, A. (2016). Advanced Engineering Thermodynamics (4th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.

Aengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). Thermodynamics: An Engineering Approach (8th ed.). New York: McGraw-Hill Education.

Damanhuri, E., & Padmi, T. (2012). Pengelolaan sampah di Indonesia: Permasalahan dan peluang pengembangan teknologi. Jurnal Teknik Lingkungan ITB, 18(2), 89-102.

Dinas Lingkungan Hidup dan Persampahan (DLHP) Kota Ambon. (2024). Laporan Tahunan Timbulan dan Pengelolaan Sampah Kota Ambon Tahun 2024. Ambon: DLHP Kota Ambon.

Dincer, I., & Rosen, M. A. (2013). Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development (2nd ed.). Oxford: Elsevier.

Filippis, P. D., & Lavorgna, M. (2014). Municipal solid waste pre-drying for energy recovery: Effects on combustion performance and emissions. Energy Procedia, 45, 643-652. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.069

Gebreslassie, B. H., Medrano, M., & Boer, D. (2013). Exergy-based analysis of a waste-to-energy power plant. Energy, 55, 254-262. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.084

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). (2019). Pedoman Teknis Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Jakarta: Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). (2020). Status Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga di Indonesia. Jakarta: KLHK.

Kotas, T. J. (2013). The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. Waste Management, 69, 407-422. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046

Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). Fundamentals of Engineering Thermodynamics (9th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.

Mujumdar, A. S. (Ed.). (2014). Handbook of Industrial Drying (4th ed.). Boca Raton: CRC Press.

Ozcan, H., & Dincer, I. (2014). Thermodynamic analysis of a municipal solid waste gasification plant. Energy, 71, 811-824. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.002

Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). Perry's Chemical Engineers' Handbook (8th ed.). New York: McGraw-Hill Education.

Republik Indonesia. (2008). Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah. Lembaran Negara RI Tahun 2008 Nomor 69. Jakarta: Sekretariat Negara.

Republik Indonesia. (2025). Peraturan Presiden Nomor 109 Tahun 2025 tentang Penyelenggaraan Pengelolaan Sampah Berbasis Teknologi Ramah Lingkungan. Jakarta: Sekretariat Negara.

Rosen, M. A., & Dincer, I. (2003). Exergy analysis of waste emissions. International Journal of Energy Research, 27(12), 1153-1163. https://doi.org/10.1002/er.936

Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(5), 2262-2289. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015

Sekretariat Jenderal Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 19-2454-2002: Tata Cara Teknik Operasional Pengelolaan Sampah Perkotaan. Jakarta: BSN.

Sekretariat Jenderal Badan Standardisasi Nasional. (2015). SNI 19-3964-1995: Metode Pengambilan dan Pengujian Contoh Sampah Perkotaan. Jakarta: BSN.

International Organization for Standardization. (2015). ISO 14001:2015 - Environmental Management Systems. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2018). ISO 45001:2018 - Occupational Health and Safety Management Systems. Geneva: ISO.

Suryani, A., & Yulianto, A. (2019). Karakteristik sampah pesisir di wilayah timur Indonesia dan implikasinya terhadap teknologi pengolahan. Jurnal Teknik Lingkungan, 25(3), 145-158.

Tan, S. T., Ho, W. S., Hashim, H., Lee, C. T., Taib, M. R., & Ho, C. S. (2015). Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia. Energy Conversion and Management, 102, 111-120. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.010

Werther, J., & Ogada, T. (1999). Sewage sludge combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 25(1), 55-116. https://doi.org/10.1016/S0360-1285(98)00020-3

Zhang, Y., Ghaly, A. E., & Li, B. (2012). Physical properties of corn residues. American Journal of Biochemistry and Biotechnology, 8(2), 44-53. https://doi.org/10.3844/ajbbsp.2012.44.53

Zhao, X., Ma, C., & You, F. (2016). Energy-water nexus of energy infrastructure: An Exergy Analysis Approach. Applied Energy, 180, 432-445. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.001

Zhao, Y., & Wang, J. (2017). Exergy analysis of a waste-to-energy power plant with integrated drying system. Energy Conversion and Management, 150, 1020-1030. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.062

Zhou, H., Meng, A., Long, Y., Li, Q., & Zhang, Y. (2015). An overview of characteristics of municipal solid waste fuel in China: Physical, chemical composition and heating value. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 36, 107-122. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.024