

Analisis Potensi Sampah Plastik sebagai Bahan Bakar PLTSa dengan Memanfaatkan Teknologi Siklus Rankine Organik

Andinusa Rahmandhika^{1*}, Daryono², Ali Mokhtar³ dan Yepy Komaril Sofi'i⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Malang, Indonesia
*andinusa@umm.ac.id

***Abstract:** Energy scarcity in Indonesia is caused by the depletion of fossil energy supply, which requires the government to obtain alternative energy, one of which is waste energy. One way to use it is by building small-scale power plants and increasing their efficiency. In this study, an analysis of the potential calorific value of plastic waste was carried out as well as a mini powerplant simulation using Cycle Tempo software. Utilization of hot steam from burning waste as a heat source for waste powerplant. The components of the power generation system include pumps, boilers, turbines, and condensers. Pressure and temperature variations are carried out to obtain optimal values so that the highest power and efficiency are obtained. The results showed that the highest power and efficiency values were at a mass flow rate of 35 kg/s and a boiler output temperature of 125 °C, namely 2.86 kW and 45.52%. Meanwhile, in optimizing the pump output pressure, the highest power value is 2902 kW at a pressure of 35 bar. This research is intended as a first step in the utilization of plastic waste to reduce heat losses and increase efficiency.*

***Keywords:** Waste; powerplant; Cycle Tempo; ORC*

Abstrak: Kelangkaan energi di Indonesia diakibatkan oleh semakin menipisnya suplai energi fosil mengharuskan pemerintah untuk mendapatkan energi alternatif, salah satunya pada energi sampah. Salah satu cara pemanfaatannya adalah dengan pembangunan pembangkitan listrik skala kecil dan peningkatan efisiensinya. Pada penelitian ini, dilakukan analisa perhitungan potensi nilai kalor sampah plastik serta simulasi mini powerplant menggunakan software Cycle Tempo. Pemanfaatan uap panas hasil pembakaran sampah sebagai sumber panas PLTSa. Komponen dari sistem pembangkit daya tersebut meliputi pompa, boiler, turbin, dan kondensor. Variasi tekanan dan temperature dilakukan untuk mendapatkan nilai optimal, sehingga didapatkan daya dan efisiensi paling tinggi. Hasil penelitian didapatkan bahwa nilai daya dan efisiensi tertinggi pada laju aliran massa 35 kg/s dan suhu keluaran boiler 125 °C, yaitu 2,86 kW dan 45,52%. Sementara pada optimasi tekanan keluaran pompa, didapatkan nilai daya tertinggi sebesar 2902 kW pada tekanan 35 bar. Penelitian ini dimaksudkan sebagai langkah awal pemanfaatan sampah plastik dalam rangka mengurangi kerugian kalor dan meningkatkan efisiensi.

Kata kunci : Sampah; PLTSa; Cycle Tempo; ORC

I. PENDAHULUAN

Dewasa ini, permasalahan sampah merupakan hal yang serius dan menjadi concern pemerintah untuk segera ditangani. Pola hidup masyarakat yang sangat konsumtif berkontribusi terhadap peningkatan jumlah sampah setiap tahunnya. Kota Malang sebagai salah satu kota metropolitan di Jawa Timur juga termasuk yang berperan penting dalam produksi sampah di Jawa Timur. Berdasarkan data dari Dinas LHK Kota Malang, rata-rata jumlah sampah per hari dapat mencapai 670 ton [1], [2]. Hal tersebut menyebabkan penumpukan volume sampah yang tinggi di TPA Supiturang bila tidak dikelola dengan baik.

Jika dilihat dari kategorinya, 70% komposisi sampah di TPA Supiturang berasal dari sampah organik, adapun sisanya berupa sampah anorganik [3]. Walaupun mudah terurai, sampah organik tersebut cukup berbahaya bila ditimbun, karena akan menghasilkan gas metana yang dapat merusak lapisan ozon. Beberapa upaya telah dilakukan untuk seperti memanfaatkan gas metan sampah organik sebagai pengganti LPG. Selain itu, ada juga yang memanfaatkan gas metana sebagai bahan bakar PLTSa berbasis Landfill Pretreatment [4], [5]. Namun, pemanfaatan sampah anorganik belum banyak dimaksimalkan. 12,7 % dari total sampah TPA Supiturang merupakan plastik, sementara 4,9 %

adalah kertas. Sehingga, setidaknya 15 % sampah anorganik masih dapat didaur ulang atau dimanfaatkan menjadi bahan bakar pembangkit listrik. Pemanfaatan sampah plastik sebagai bahan bakar pembangkit listrik juga bukan tanpa masalah. Sampah yang dibakar akan menghasilkan dioxin yang beracun dan berbahaya bagi tubuh [6]. Kebanyakan sampah harus diolah menjadi bahan bakar padat/cair terlebih dahulu menggunakan teknologi pyrolysis [7], [8]. Namun, volume sampah yang cukup banyak akan memperlama proses pengolahan sampah plastik menjadi bahan bakar yang layak digunakan. Beberapa solusi yang ditawarkan adalah dengan mendesain double-stages incinerator sehingga abu dan gas hasil pembakaran dapat difilter terlebih dahulu sebelum dilepaskan ke lingkungan [9].

II. METODE PENELITIAN

A. Teknologi Organic rankine cycle (ORC)

Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) memanfaatkan sampah sebagai bahan bakar, dalam hal ini yang digunakan adalah sampah plastik yang mengandung hidrokarbon. Tahapan pengolahan sampah untuk siap dibakar adalah dengan mengelompokkannya terlebih dahulu, sehingga sampah berupa logam maupun sampah organik tidak ikut terbakar. Adapun sampah plastik masih perlu dikelompokkan lagi berdasarkan karakteristiknya, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 [10].

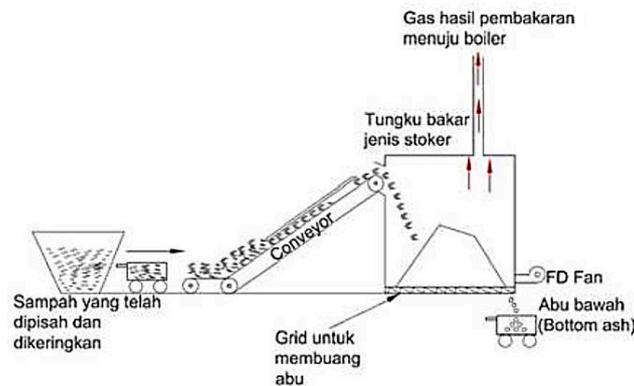
Tabel 1. Karakteristik jenis plastik

Kategori	Kepanjangan	Penggunaan	Bahaya & Kesulitan Terurai
PET	<i>Polyethylene terephthalate</i>	botol air mineral, jus, <i>soft drink</i> , atau kecap	Sedang
HDPE	<i>high density polyethylene</i>	botol susu, kosmetik, shampo, dan tas kresek	Sedang
PVC	<i>polyvinyl chloride</i>	plastik wrap, kotak makan plastik, mainan	Tinggi
LDPE	<i>low density polyethylene</i>	bungkus makanan, bungkus roti, dan <i>dry cleaning bag</i>	Rendah
PP	<i>polypropylene</i>	botol bayi, botol obat, sedotan, dan tempat margarin	Rendah
PS	<i>polystyrene</i>	cup minuman, pembungkus makanan <i>take away</i> , dan <i>cooler</i>	Tinggi
PC	<i>polycarbonate</i>	botol minuman, tas oven, atau <i>packaging</i>	Tinggi

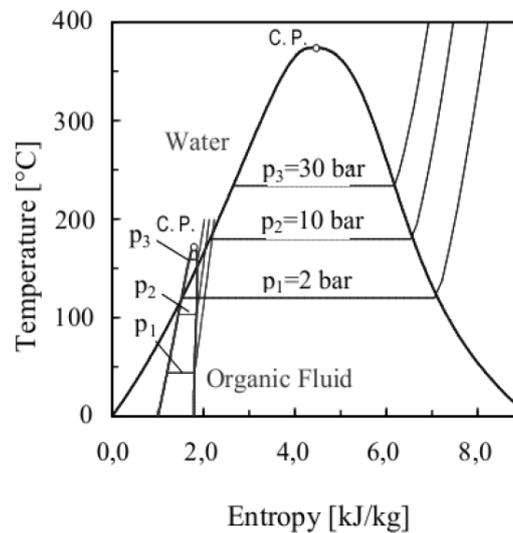
Sampah dicacah menggunakan mesin agar proses pembakaran menghasilkan nyala api yang lebih stabil. Sampah dipress agar kadar airnya berkurang. Air lindi dialirkan ke pipa khusus untuk memisahkannya dengan sampah plastik. Sampah kemudian dibiarkan beberapa hari agar kadar air benar-benar hilang, kemudian ditimbang sebelum masuk incinerator. Sampah kering ini kemudian diangkut ke tungku pembakaran dengan grabber yang dikendalikan dari jarak jauh dari ruang kendali. Sampah dari grabber dijatuhkan sedikit demi sedikit kedalam hopper tungku, lalu dimasukkan kedalam tungku pembakaran. Tungku dirancang sedemikian sehingga sampah dapat terbakar pada suhu tertentu dalam waktu yang lama, sehingga seluruh sampah dapat terbakar sempurna serta menghilangkan gas beracun yang terbentuk seperti dioksin. Start-up awal pembakaran memerlukan bahan bakar pembantu seperti minyak bakar, gas atau batu bara. Sisa pembakaran berupa abu dikeluarkan secara otomatis dan dikumpulkan sebelum dimanfaatkan lebih lanjut, debu yang dihasilkan dari sisa pembakaran idealnya sekitar 20% dari berat sampah sebelum masuk incinerator. Gas panas hasil pembakaran kemudian dimanfaatkan untuk menguapkan air yang berada pada boiler atau heat exchanger [11].

ORC merupakan sistem pembangkit daya yang mirip dengan siklus Rankine konvensional, perbedaannya hanya pada penggunaan fluida kerja. Bila pada siklus Rankine pada umumnya menggunakan air sebagai fluida kerja, air maka pada siklus Rankine organik menggunakan fluida kerja berupa cairan organik. Cairan organik yang dimaksud adalah fluida yang mengandung unsur karbon dalam rantai kimianya dan memiliki titik didih yang rendah pada tekanan atmosfer. Gambar 3 menunjukkan perbandingan diagram T-s air dengan fluida organik. Seperti siklus rankine

konvensional, ORC membutuhkan beberapa komponen, diantaranya pompa, evaporator/boiler/heater, turbin, dan kondensator.



Gambar 1. Sistem distribusi bahan bakar sampah kering sampai ke ruang bakar [12]



Gambar 2. Perbandingan Diagram T-s Air dan Fluida Organik

B. Pemilihan Fluida Kerja ORC

Pemilihan fluida kerja didasari oleh temperature exhaust masuk ke sistem dan pada pembuangan. Proses pemilihannya juga harus mempertimbangkan spesifikasi termodinamika, aspek K3, lingkungan, dan ekonomi [13]. Spesifikasi termodinamika dari fluida biasanya menggunakan diagram T-s. Fluida yang entropi pada garis saturasi uapnya meningkat seiring meningkatnya suhu dinamakan fluida kering. Fluida yang memiliki nilai entropi pada uap saturasi mengalami penurunan ketika suhunya naik disebut fluida basah. Fluida dengan tipe kurva saturasi dengan kemiringan vertikal dinamakan fluida isentropik. Pada siklus Rankine konvensional, air (fluida basah) digunakan sebagai fluida kerja karena memenuhi aspek K3 dan kesediaannya yang melimpah [14]. Hal tersebut kurang cocok untuk sistem ORC, karena uap fluida basah berubah menjadi saturasi ketika melepaskan banyak entalpi setelah memutar turbin. Kondensat yang timbul terlalu cepat sebelum keluar turbin menimbulkan korosi pada turbin. Fluida kering dan isentropik dapat mencegah kerugian tersebut [15].

Tabel 1 memperlihatkan karakteristik dan potensi pengaruh beberapa fluida kerja untuk sistem ORC terhadap lingkungan. Tbp adalah titik didih pada tekanan atmosfer, Tcrit dan Pcrit adalah titik kritis suhu dan tekanan fluida. Huruf “A” Pada kolom keselamatan melambangkan potensi racun rendah, sementara huruf “B” melambangkan potensi racun yang tinggi. Sementara digit angka

melambangkan potensi mudah terbakar. Semakin tinggi angka, maka fluida akan semakin mudah terbakar. Pemilihan fluida kerja juga perlu memperhatikan berbagai aspek, seperti K3 dalam penggunaan, meliputi pemilihan fluida kerja yang non-flamable, tidak beracun, dan memperhatikan ODP yang mempengaruhi kerusakan ozon dan pemanasan global.

Tabel 1. Karakteristik Beberapa Fluida Kerja [15]

Bahan	Data Fisik				Kelompok Keselamatan	Data Lingkungan		Tipe
	Massa Molar (kg/kmol)	T _{bp} pada 1bar (°C)	T _{crit} (°C)	P _{crit} (MPa)		ODP	GWP (100yr)	
R717	17,03	-33,33	132,25	11,333	B2	0	<1	Basah
R11	137,37	23,71	197,96	4,408	A1	1	4750	i
R12	120,91	-29,75	111,97	4,136	A1	1	2400	i
R22	86,45	-40,7	96,2	4,936	A1	0,05	1700	i
R123	152,93	27,82	183,68	3,662	B1	0,02	77	Kering, i
R134a	102,03	-26,07	101,06	4,059	A1	0	1430	i
R245fa	134,05	14,90	154,05	3,640	B1	0	1030	i
R245ca	134,05	25,13	174,42	3,925	n.a.	0	693	Kering
R718	18,02	99,97	373,95	22,064	A1	0	<1	Basah

C. Efisiensi dan Sistem Transfer Kalor pada Heat Exchanger

Performansi sistem ORC dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah kalor yang masuk ke heat exchanger, laju aliran masa exhaust gas dan fluida kerja, tekanan dan suhu di setiap komponen, serta konfigurasi perbedaan suhu LMTD di heat exchanger. Efisiensi didapatkan dengan membandingkan kerja netto sistem yang dihasilkan terhadap kalor yang diserap pada HE seperti persamaan (1):

$$\eta_R = \frac{W_{out}}{Q_{heater,in}} \tag{1}$$

Perpindahan kalor dibagi menjadi 3 tahap, yaitu economizer sebagai pemanas awal, evaporator sebagai pengubah fasa dari liquid menjadi gas, dan superheater untuk pemanasan akhir agar entalpi meningkat lagi. Pada masing-masing heat exchanger, konfigurasi yang digunakan adalah tipe shell and tube. Sementara beda suhu rata-rata logaritmik (LMTD) adalah perbedaan suhu rata-rata setiap bagian HE, karena perbedaan suhu di setiap bagian HE tidak sama. Rumus ΔT_{LMTD} yang mengacu pada HE tipe shell and tube adalah sebagai berikut:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{hot,in} - T_{cold,out}) - (T_{hot,out} - T_{cold,in})}{\ln\left(\frac{T_{hot,in} - T_{cold,out}}{T_{hot,out} - T_{cold,in}}\right)} \tag{2}$$

dimana :

- T_{hot,in} = suhu masukan fluida pemanas (°C)
- T_{hot,out} = suhu keluaran fluida pemanas (°C)
- T_{cold,in} = suhu masukan refrigeran (°C)
- T_{cold,out} = suhu keluaran refrigeran (°C)

Berdasarkan harga \dot{Q}_{in} , ΔT_{LMTD} , dan UD, luas permukaan perpindahan panas (AS) dapat ditentukan menggunakan persamaan (3).

$$A_S = \frac{\dot{Q}_{in}}{U_D \Delta T_{LMTD}} \tag{3}$$

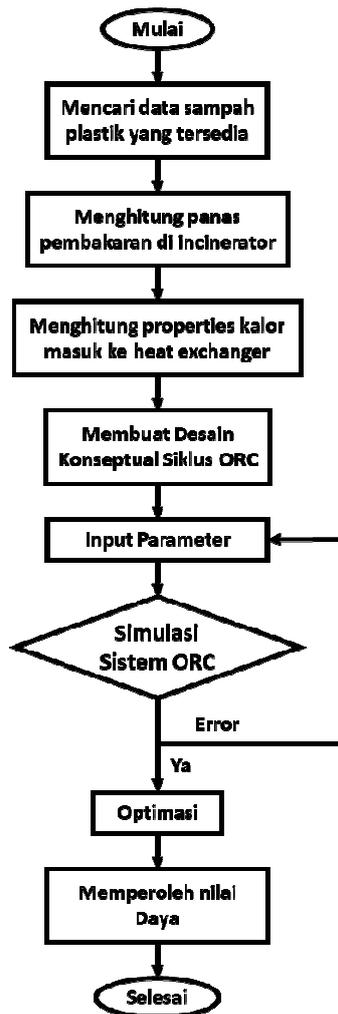
dimana :

- \dot{Q}_{in} = aliran kalor masuk (J/s)
- UD = koefisien perpindahan kalor total (W/m²°C)

ΔT_{LMTD} = beda temperatur rata-rata logaritmik

D. Metode dan Desain Siklus

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah perhitungan analitis dan simulasi. Diagram alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 3. Langkah pertama mencari data valid mengenai jumlah sampah plastik yang tersedia di TPA Supiturang, kemudian menghitung panas pembakaran yang terjadi di ruang bakar. Setelah itu, dilakukan perhitungan jumlah kalor berupa uap hasil pembakaran dari incinerator. Uap tersebut akan bertindak sebagai feed atau hot fluid pada heat exchanger. Uap panas hasil pembakaran akan memanaskan fluida kerja sehingga berubah fase menjadi uap. Dari nilai kalor yang didapatkan, laju aliran massa uap serta temperature hot fluid juga dapat ditentukan.

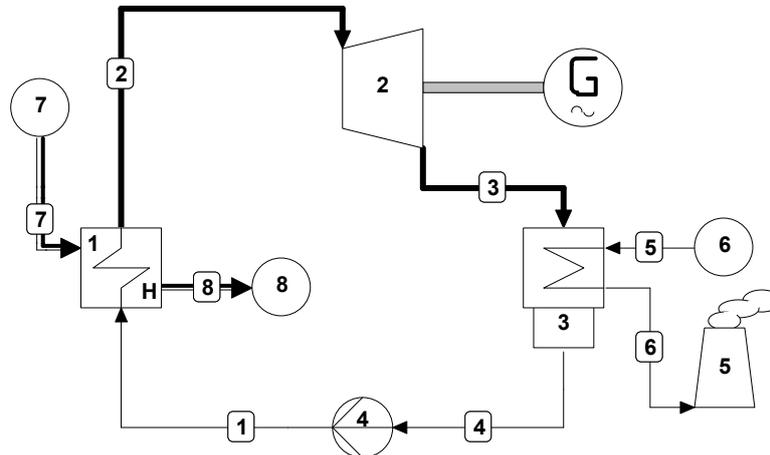


Gambar 3. Diagram Alur Penelitian

Langkah selanjutnya adalah menentukan konsep perencanaan siklus organic rankine cycle. Beberapa komponen utama siklus powerplant perlu disertakan meliputi turbin, pompa, kondensor, serta boiler/heat exchanger sebagai sistem penukar kalor. Proses simulasi dimulai dengan menginputkan data ke masing-masing komponen. Data perhitungan di heat exchanger adalah yang paling perlu untuk diperhatikan, karena nilai ΔT_{LMTD} , ΔT_{HT} , ΔT_{LT} , dan laju aliran massa refrigerant akan mempengaruhi desain dan konfigurasi heat exchanger. Selanjutnya akan dilakukan

running program dengan beberapa variasi tekanan operasi, serta optimasi sistem ORC. Dari hasil simulasi akan didapatkan daya turbin dan daya yang dihasilkan generator dari nilai efisiensi yang telah ditetapkan.

Adapun desain konseptual sistem ORC diperlihatkan oleh Gambar 4. Komponen 1-9 berturut-turut adalah heat exchanger, turbin, kondensator, pompa, cerobong, sumber air pendingin, hot fluid source, hot fluid sink. Sementara itu, garis 1-4 adalah refrigerant, garis 5 dan 6 adalah fluida pendingin, dan garis 7 dan 8 adalah hot fluid.



Gambar 4. Desain sistem ORC sederhana menggunakan *heat exchanger*

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

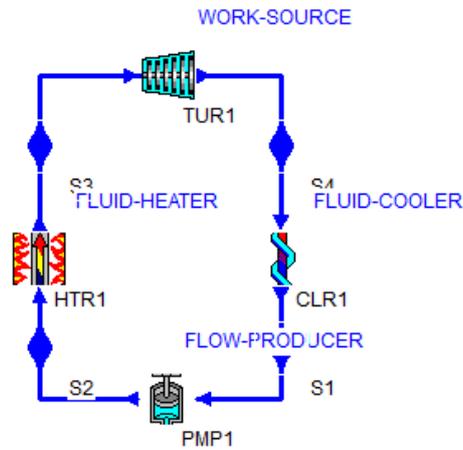
Proses simulasi dimulai dengan menentukan jumlah umpan yang masuk ke dalam boiler. Data statistik menunjukkan bahwa sampah yang masuk ke TPA per hari sebesar 458 ton, dimana 12% nya berupa sampah plastik. Bila jumlah sampah plastik tersebut dikonversikan ke dalam satuan umum laju aliran massa, maka didapatkan 0,63 kg/s sampah plastik yang dipasok sebagai feed ke boiler. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Landi (2017), diperoleh nilai LHV pyrolisis dari sampah plastik bervariasi, yaitu berkisar 6800 – 9500 kalori/gram [8]. Dari nilai tersebut, diambil nilai 7000 kal/gr untuk dikonversikan menjadi 29300 kJ/kg. Nilai tersebut tentu lebih tinggi dibandingkan nilai kalor yang dapat ditransfer dari hasil pembakaran sampah plastik secara langsung tanpa melalui proses pyrolisis. Sehingga, diasumsikan LHV untuk proses pembakaran sampah plastik (LDPE) secara langsung tereduksi 30-40%, yaitu sekitar 20000 kJ/kg.

Persamaan untuk menentukan besar transfer kalor pada boiler ditunjukkan pada persamaan (4) [16].

$$\dot{m} \times LHV = \dot{m} \times c \times \Delta T \tag{4}$$

Dari persamaan tersebut, dapat diketahui bahwa potensi laju aliran kalor maksimal yang dapat dihasilkan dari pembakaran sampah plastik di boiler adalah 12600 kJ/s. Nilai tersebut merupakan nilai ideal pada proses perpindahan kalor. Pada penerapannya, terdapat kerugian kalor, meliputi sampah yang tidak terbakar sempurna, blowdown, adanya kondensat, konveksi dan radiasi, dll. Oleh karena itu, nilai laju aliran kalor yang diterima oleh fluida organik diasumsikan hanya 50%, yaitu 6300 kJ/s.

Skema hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 5, menunjukkan proses sederhana dari siklus pembangkit listrik. Fluida organik yang digunakan adalah R134a, karena merupakan fluida isentropis. Selain itu, R134a memiliki temperatur kritis pada 101 oC sehingga pengoptimalan nilai laju aliran massa nya dapat ditingkatkan.

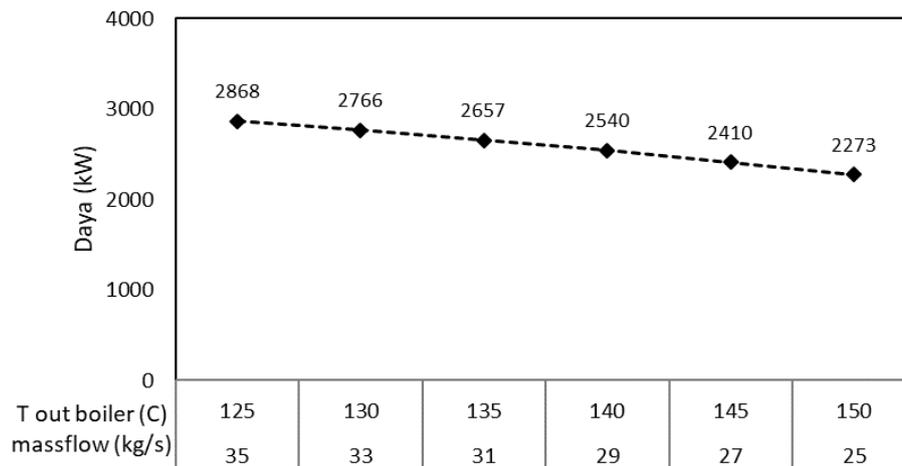


Gambar 5. Skema simulasi pembangkit listrik tenaga sampah sederhana

Feed masuk ke boiler dan memanaskan fluida kerja sehingga berubah ke fase superheated dan menggerakkan turbin. Variasi nilai fluida kerja keluar boiler ditunjukkan pada Tabel 2. Variasi nilai tersebut berdasarkan pertimbangan nilai kalor yang terserap oleh refrigeran. Semakin tinggi nilai suhu keluaran refrigeran, dimana menandakan kenaikan nilai ΔT , maka akan mengakibatkan penurunan pada laju aliran massa fluida.

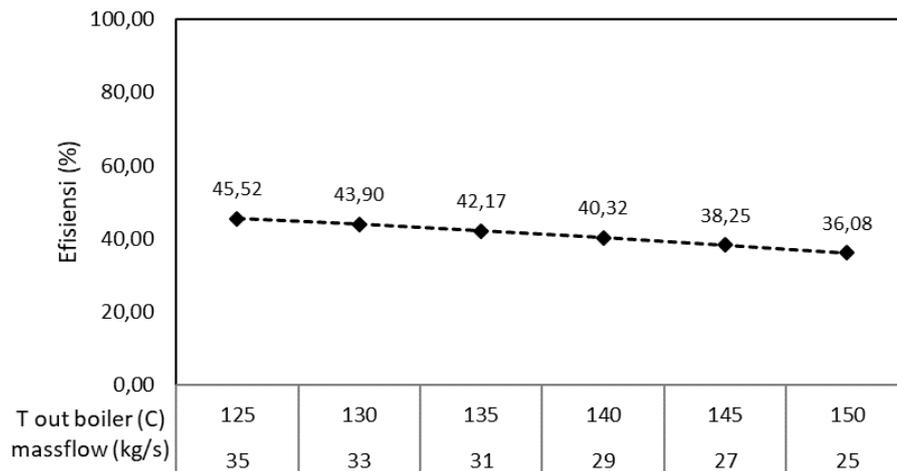
Tabel 2. Variasi properties R134a keluar boiler

Variasi	m (kg/s)	Tout (C)
1	35	125
2	33	130
3	31	135
4	29	140
5	27	145
6	25	150



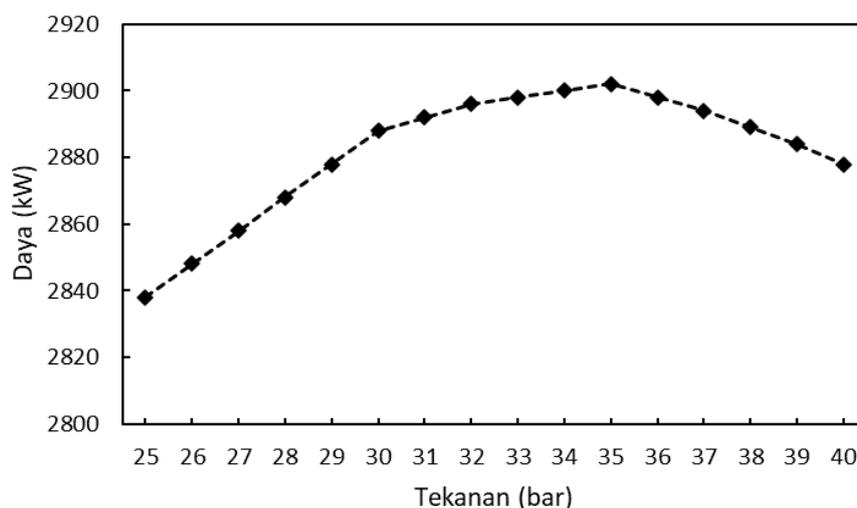
Gambar 6. Perbandingan nilai daya keluaran turbin dengan variasi suhu keluaran boiler dan laju aliran massa refrigeran

Berdasarkan variasi nilai keluaran refrigeran dari boiler, disimulasikan nilai daya yang dapat dihasilkan oleh turbin, dimana diperhitungkan nilai kerugian daya sebesar 10 kW. Perumusan nilai daya tersebut diasumsikan bahwa tekanan yang keluar dari turbin akan menjadi 1 bar atau 100 kPa. Grafik nilai daya dan efisiensi siklus ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Berdasarkan kedua grafik tersebut, nilai daya dan efisiensi tertinggi terjadi pada variasi suhu keluaran boiler 125 oC dan laju aliran massa 35 kg/s, yaitu 2,868 MW dan 45,52%.



Gambar 7. Perbandingan nilai efisiensi siklus dengan variasi suhu keluaran boiler dan laju aliran massa refrigeran

Nilai daya maksimal kemudian digunakan sebagai acuan optimasi nilai keluaran daya, dimana laju aliran massa yang digunakan adalah 35 kg/s dengan suhu keluaran boiler tetap 125 oC. Optimasi dilakukan dengan memvariasikan nilai tekanan keluaran pompa, yaitu dari 25 – 40 bar. Gambar 8 menunjukkan hasil variasi nilai tekanan keluaran pompa. Didapatkan nilai daya tertinggi yang dihasilkan adalah pada tekanan 35 bar, yaitu 2902 kW.



Gambar 8. Perbandingan daya output turbin terhadap variasi tekanan output pompa

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang didapatkan, dapat disimpulkan bahwa TPA Supiturang memiliki potensi daya hingga sebesar 2,8 MW bila dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik dengan memanfaatkan ORC. Nilai tersebut didapatkan ketika pembakaran dilakukan hingga fluida kerja berada pada suhu 125 0C setelah melalui boiler dengan mass flowrate sebesar 35 kg/s. Efisiensi yang didapatkan mencapai 45,52% dari total energi yang didapat dihasilkan. Adapun pada kondisi operasi tersebut, daya masih dapat ditingkatkan melalui optimasi, yaitu pada tekanan pompa sebesar 35 bar, sehingga daya dihasilkan mencapai 2,9 MW.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Muhammadiyah Malang yang telah memberikan dana hibah Penelitian dan Pengembangan Iptek (P2I) tahun 2020-2021.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Amalia, "Sampah di Kota Malang Terus Bertambah," *timesindonesia.co.id*, 2019. <https://www.timesindonesia.co.id/read/news/243679/sampah-di-kota-malang-terus-bertambah> (accessed Feb. 14, 2021).
- [2] Dinas Kebersihan dan pertamanan, "Pengelolaan Sampah di Kota Malang," p. 40, 2013.
- [3] "Upt tpa supiturang," Malang, 2017.
- [4] W. H. Wijaya, P. Magister, B. Keahlian, R. Energi, J. T. Fisika, And F. T. Industri, "(Pltsa) Berbasis Landfill (Studi Kasus : Tpa Supit Urang Kota Malang , Jawa Timur) Landfill Pretreatment With Hcci Generator (Case Study : Supit Urang Landfill On Malang , East Java)," 2016.
- [5] Perinov and Monice, "Analisis Potensi Sampah Sebagai Bahan Baku Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (Pltsa) Di Pekanbaru," *SainETIn*, vol. 1, no. 1, pp. 9–16, 2017, doi: 10.31849/sainetin.v1i1.166.
- [6] S. Sumingkrat, "Terbentuknya Dioksin Akibat Reaksi Kimia Pada Proses Pembakaran Dan Dampaknya Bagi Manusia," *Jurnal Kimia dan Kemasan*. p. 7, 2009, doi: 10.24817/jkk.v0i0.4745.
- [7] Y. Gunawan, L. Karimuna, and R. Balaka, "Energi terbarukan dari sampah plastik di tpa puuwatu dengan memanfaatkan teknologi pirolisis guna mendukung masyarakat mandiri energi di kota kendari," 2018.
- [8] T. Landi and A. Arijanto, "Perancangan Dan Uji Alat Pengolah Sampah Plastik Jenis Ldpe (Low Density Polyethylene) Menjadi Bahan Bakar Alternatif," *J. Tek. Mesin Undip*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2017.
- [9] Hermansyah, "Solusi Mengatasi Polusi Udara Pada Pembakaran Sampah," *Jur. Fis. Fak. Sains dan Teknol. Univ. Islam Negeri Alauddin Makassar*, vol. 4, no. 1, pp. 38–48, 2017.
- [10] O. M. Jazani *Et Al.*, "Pemanfaatan Limbah Plastik Sebagai Bahan Baku Pembuatan Bahan Bakar Alternatif," *Polym. Bull.*, vol. 74, no. 11, pp. 4483–4497, 2017, doi: 10.1007/s00289-017-1962-x.
- [11] R. Samsinar and K. Anwar, "Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah Kapasitas 115 Kw (Studi Kasus Kota Tegal)," *J. Elektrum*, vol. 15, no. 2, pp. 33–40, 2018, [Online]. Available: <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/elektum/article/view/3194/2551>.
- [12] R. Nurhasanah, "Perancangan Boiler Dengan Memanfaatkan Sampah Kering Untuk Bahan Bakar Pltu Mini 3 kW STT-PLN," *Power Plant*, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, 2018, doi: 10.33322/powerplant.v5i1.113.
- [13] H.M.D.P.Herat, M.A.Wijewardane, R.A.C.P.Ranasinghe, and J.G.A.S.Jayasekera, "Working fluid selection of Organic Rankine Cycles," *Energy Reports*, vol. 6, no. 9, pp. 680–686, 2020,

- [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484720315754>.
- [14] X. Zhang, Y. Zhang, and J. Wang, "New classification of dry and isentropic working fluids and a method used to determine their optimal or worst condensation temperature used in Organic Rankine Cycle," *Energy*, vol. 201, p. 117722, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117722.
- [15] Z. Sun, S. Wang, F. Xu, and W. He, "Multi-parameter optimization and fluid selection guidance of a two-stage organic Rankine cycle utilizing LNG cold energy and low grade heat," *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 1222–1229, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.510.
- [16] I. N. Sukarta and P. S. Ayuni, "Analisis Proksimat Dan Nilai Kalor Pada Pelletbiosolid Yang Dikombinasikan Dengan Biomassalimbah Kayu," in *Seminar Nasional Riset Inovatif III*, 2015, pp. 490–495.