

PERBANDINGAN PERFORMANSI BOILER BATCH DAN BOILER KONTINU

PERFORMANCE COMPARISON BETWEEN BATCH AND CONTINUOUS BOILERS AND CONTINUOUS BOILERS

Universitas Pasundan – Magister Teknik Mesin - Asep Bahtiar – NPM. 238070009

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun boiler kontinu dan mengetahui perbandingan efisiensi boiler batch dan boiler kontinu dengan menggunakan metode eksperimen Desain Faktorial 2^3 dan metode OFAT (One Factor at a time). Variable input yang digunakan adalah tekanan boiler (0,8 bar, 0,9 bar, 1 bar, 1,1 bar, 1,2 bar, dan 1,3 bar), Volume air umpan (10 liter, dan 12,5 liter), Setting nyala api (75%, dan 100%), Mode Operasi (Batch, dan Kontinu), Tekanan atmosfer (0,989 bar). Variable output meliputi produksi uap kg/jam, konsumsi gas kg/jam, dan Efisiensi % boiler. Hasil penelitian menunjukkan pada metode desain factorial 2^3 boiler kontinu lebih unggul dibanding dengan boiler batch dengan nilai rata – rata perbandingan produksi uap boiler kontinu 0,2927 kg/jam dan boiler batch 0,0488, rata – rata perbandingan konsumsi gas boiler kontinu 0,2130 kg/jam, dan rata – rata perbandingan efisiensi boiler kontinu 7,888% dan boiler batch 2,375%. Variable yang paling berpengaruh terhadap peningkatan efisiensi pada boiler adalah setting nyala api yang meningkatkan dari 75% ke 100% meningkatkan efisiensi sebesar 0,987% pada boiler kontinu, sedangkan pada boiler batch dari 100% ke 75% meningkatkan efisiensi sebesar 2,276%. Pada metode OFAT boiler batch menghasilkan uap tertinggi sebesar 0,516 kg/jam dan boiler kontinu 0,7602 kg/jam. Konsumsi gas pada boiler batch tertinggi 0,2211 kg/jam dan boiler kontinu 0,6679 kg/jam. Efisiensi boiler dengan metode OFAT pada batch lebih unggul yaitu 23,53% dan kontinu 10,14%. Namun, hasil analisis pada metode eksperimen OFAT menampilkan koefisien determinasi (R^2) yang rendah yaitu pada efisiensi boiler batch 0,3406 dan 0,2899 pada boiler kontinu.

Kata kunci : Boiler, Boiler Batch, Boiler Kontinu, Efisiensi, Sistem kendali.

ABSTRACT

This study aims to design a continuous boiler and compare the efficiency of batch and continuous boilers using the experimental methods of Factorial Design 2^3 and OFAT (One Factor at a Time). The input variables used are boiler pressure (0.8 bar, 0.9 bar, 1 bar, 1.1 bar, 1.2 bar, and 1.3 bar), feedwater volume (10 liters and 12.5 liters), flame setting (75% and 100%), operation mode (Batch and Continuous), and atmospheric pressure (0.989 bar). The output variables include steam production (kg/hour), gas consumption (kg/hour), and boiler efficiency (%). The results show that using the 2^3 -factorial design method, the continuous boiler outperforms the batch boiler, with an average steam production comparison of 0.2927 kg/hour for the continuous boiler and 0.0488 kg/hour for the batch boiler, an average gas consumption comparison of 0.2130 kg/hour for the continuous boiler, and an average efficiency comparison of 7.888% for the continuous boiler and 2.375% for the batch boiler. The most influential variable on efficiency improvement in the boiler is the flame setting, where increasing from 75% to 100% raises efficiency by 0.987% in the continuous boiler, while in the batch boiler, decreasing from 100% to 75% improves efficiency by 2.276%. In the OFAT method, the batch boiler produces the highest steam at 0.516 kg/hour, and the continuous boiler at 0.7602 kg/hour. The highest gas consumption in the batch boiler is 0.2211 kg/hour, while in the continuous boiler, it is 0.6679 kg/hour. The boiler efficiency using the OFAT method is superior in the batch mode at 23.53%, compared to 10.14% in the continuous mode. However, the analysis using the OFAT experimental method reveals low coefficients of determination (R^2), with 0.3406 for batch boiler efficiency and 0.2899 for continuous boiler efficiency.

Keywords: Boiler, Batch Boiler, Continuous Boiler, Efficiency, Control System.

1. Pendahuluan

Air tawar merupakan salah satu kebutuhan manusia yang sangat vital. Sekitar 71% permukaan bumi terdiri dari air, 97% air bersifat payau yang tidak layak diminum, dan 2,5% gletser kutub yang tidak dapat digunakan. Hanya 0,5% dari seluruh air tanah yang layak diminum untuk kehidupan manusia. Seperti yang telah diprediksi, sekitar 40% populasi dunia akan tinggal di daerah yang mengalami krisis air pada tahun 2050. Oleh karena itu, di daerah yang tidak memiliki cukup air tawar, Solusi lain harus dipertimbangkan untuk mengatasi masalah ini. Di antara semua Solusi, proses desalinasi air laut merupakan alternatif yang efektif [1].

Desalinasi adalah proses menghilangkan kandungan garam dan mineral dari air laut atau air payau [2], [3]. Karena 70% permukaan bumi ditutupi oleh lautan, desalinasi air laut berpotensi untuk menyediakan pasokan air tawar yang melimpah [4]. Desalinasi sendiri melayani sekitar 1% dari air minum global. Pada tahun 2020, jumlah pabrik desalinasi yang terpasang di seluruh dunia melampaui 20.000 unit. Teknologi desalinasi termal bisa jauh lebih murah jika tersedia banyak panas buang [5]. Akan tetapi, pengembangan sistem pemulihan energi yang efisien untuk menekan konsumsi energi termal belum banyak mendapat perhatian dalam penelitian [6]. Saat ini, dua teknologi yang paling umum digunakan di seluruh dunia adalah berbasis membran dan termal [7]. Salah satu metode yang menggunakan teknologi termal adalah Multiple Effect Distillation (MED) [8].

MED merupakan proses termal multi-tahap di mana uap dari satu tahap bertindak sebagai sumber panas untuk tahap berikutnya. Sebagian metode desalinasi saat ini adalah berskala besar, beberapa kekurangannya yaitu kebutuhan energi dan material yang besar sehingga menyebabkan jejak ekologi yang tinggi [9]. Pada skala kecil Multiple Effect Distillation (MED) telah dikembangkan [10], [11]. MED Mini merupakan teknologi desalinasi skala kecil yang menggunakan sistem boiler batch [11]. Namun, sistem ini memiliki kelemahan yaitu, proses produksi uap akan terhenti ketika air umpan habis. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem agar produksi uap dapat berlangsung secara terus menerus.

Permasalahan tersebut mendorong pengembangan sistem kendali, sehingga boiler dapat bekerja secara kontinu yang dapat mengatasi keterbatasan sistem boiler batch. Meski demikian, implementasi sistem kendali dengan boiler kontinu masih menghadapi tantangan, terutama dalam hal mengalirkan air secara otomatis saat volume air di dalam boiler berkurang.

Dikembangkan sebuah sistem kendali boiler kontinu dengan integrasi kontrol otomatis, untuk

memproduksi uap secara terus menerus dengan mengoptimalkan pasokan air menuju boiler. Sistem ini memanfaatkan sensor tekanan, load cell, motorized valve sebagai komponen kendali utama dan pompa diafragma sebagai komponen yang mengalirkan air umpan menuju boiler.

Penerapan sistem kendali boiler kontinu ini diharapkan dapat menjawab keterbatasan teoritis dalam studi efisiensi produksi air umpan dan efisiensi bahan bakar gas pada sistem boiler batch. Selain itu, sistem ini juga memberikan solusi nyata bagi industri yang membutuhkan proses desalinasi berkelanjutan dengan biaya rendah. Dampak praktisnya mencakup penghematan energi, dan peningkatan kapasitas produksi.

2. Metode Penelitian

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 8 bulan (Juli 2025 – Februari 2026) di Laboratorium Teknik Mesin, Universitas Galuh Ciamis.

Alat Uji

Alat uji yang digunakan dalam penelitian ini yaitu boiler, modbus, loadcell, pressure transmitter, MBV, pompa diafragma, dan perangkat sistem kendali.

Rancangan Eksperimen

Rancangan eksperimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode Desain factorial 2³ dan OFAT (*One Factor at a Time*) yang disajikan pada Tabel 1 dan 2.

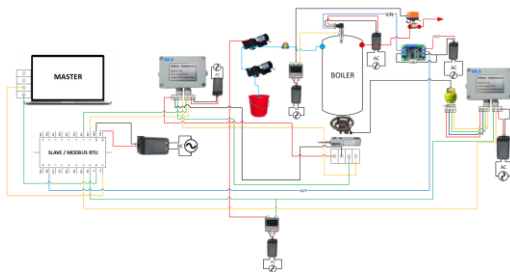
Tabel 1. Rancangan Eksperimen Desain Faktorial 2³

DESAIN FAKTORIAL 2 ³					
Konfigurasi	Tekanan Boiler (bar)	Volume Air Umpan (bar)	Setting Nyala Api (%)	Produksi Uap (kg/jam)	Konsumsi Gas LPG (kg/jam)
1(1)	0,8	10	50%		
2(5)	1,1	10	50%		
3(3)	0,8	12,5	50%		
4(7)	1,1	12,5	50%		
5(2)	0,8	10	100%		
6(6)	1,1	10	100%		
7(4)	0,8	12,5	100%		
8(8)	1,1	12,5	100%		

Tabel 2. Rancangan Eksperimen OFAT

OFAT (One Factor at a Time)					
Konfigurasi	Tekanan Boiler (bar)	Volume Air Umpan (Liter)	Setting Nyala Api (%)	Produksi Uap (kg/jam)	Konsumsi Gas LPG (kg/jam)
1	0,8	10	100%		
2	0,9	10	100%		
3	1	10	100%		
4	1,1	10	100%		
5	1,2	10	100%		
6	1,3	10	100%		

Rancang Bangun Boiler Kontinu



Gambar 1. Wiring diagram boiler kontinu

Diagram pengkabelan ini menggambarkan integrasi perangkat keras pada sistem kendali boiler kontinu, yang terdiri dari unit pengawas (master), unit pengendali lapangan (slave/Modbus RTU), rangkaian sensor, serta aktuator yang bekerja pada proses suplai air dan pembakaran. Secara umum, sistem dirancang agar proses pengukuran–pengendalian berlangsung berkelanjutan, sementara data operasi dapat dipantau dan direkam secara real time.

Unit master berperan sebagai pusat pemantauan (monitoring), pengaturan parameter, serta pencatatan data (data logging). Master berkomunikasi dengan slave/Modbus RTU sebagai pengendali lapangan yang menerima sinyal dari sensor, mengolahnya menjadi informasi proses, kemudian menghasilkan sinyal kendali untuk mengatur aktuator. Skema master–slave ini dipilih agar proses kontrol tetap berjalan stabil di level lapangan, sedangkan master dapat difokuskan untuk antarmuka pengguna dan dokumentasi data eksperimen.

Pada sisi pengukuran, beberapa sensor utama dihubungkan ke unit slave untuk memperoleh variabel proses boiler. Sensor tekanan ditempatkan pada bagian atas boiler untuk membaca kondisi tekanan operasi. Selain itu, digunakan weight transmitter (penguat/load cell transmitter) untuk mengonversi perubahan massa menjadi sinyal yang dapat dibaca sistem kontrol. Pada diagram terlihat pemasangan weight transmitter pada sisi suplai/umpan dan pada sisi bahan bakar (tabung

LPG), sehingga sistem mampu merekam perubahan massa sebagai dasar perhitungan kebutuhan fluida (air) dan konsumsi bahan bakar (LPG) selama pengujian. Seluruh sinyal sensor kemudian masuk ke kanal input pada slave, sehingga pembacaan dapat dilakukan terpusat dan konsisten.

Aktuator pada sistem ditunjukkan melalui komponen-komponen penggerak proses, seperti pompa suplai air dan katup satu arah pada jalur aliran. Pada jalur keluaran/operasi boiler juga ditunjukkan komponen katup (dengan arah aliran) yang berfungsi sebagai pengendali aliran fluida sesuai kebutuhan proses. Karena aktuator umumnya bekerja pada tegangan dan arus lebih besar dibanding rangkaian kontrol, maka digunakan modul penggerak (driver/relay/SSR) sebagai antarmuka antara sinyal kendali dari slave dan beban aktuator. Dengan konfigurasi ini, sinyal kendali bertegangan rendah dari slave dapat mengaktifkan beban daya seperti pompa secara aman dan terisolasi.

Sumber daya utama berasal dari jaringan AC yang kemudian diturunkan melalui adaptor/catu daya menjadi tegangan yang sesuai untuk perangkat kontrol dan instrumen (misalnya untuk slave, modul driver, serta transmitter). Pengkabelan disusun dengan prinsip pemisahan jalur daya dan jalur sinyal, sehingga interferensi listrik dapat diminimalkan dan pembacaan sensor lebih stabil. Ground dan referensi tegangan dijaga konsisten sesuai kebutuhan sistem agar komunikasi data dan pembacaan sensor tidak mengalami gangguan.

Saat sistem berjalan, slave membaca tekanan boiler dan perubahan massa (air umpan maupun LPG) secara periodik, kemudian mengirimkan data tersebut ke master untuk ditampilkan dan direkam. Berdasarkan parameter operasi yang ditetapkan, slave mengaktifkan aktuator melalui modul driver sehingga suplai air dan elemen kendali lainnya dapat bekerja sesuai kebutuhan proses. Dengan demikian, wiring diagram ini menunjukkan bahwa sistem telah terintegrasi sebagai satu kesatuan: sensor → akuisisi data (slave) → kendali aktuator → monitoring dan logging (master), yang mendukung operasi boiler secara kontinu dan terukur.

Efisiensi Boiler

Efisiensi boiler pada penelitian ini dihitung untuk mengetahui seberapa besar energi kimia bahan bakar yang berhasil dikonversi menjadi energi panas pada uap yang dihasilkan. Metode yang digunakan adalah pendekatan neraca energi sederhana (direct method), yaitu membandingkan laju energi keluaran berupa panas yang dibawa uap terhadap laju energi masukan dari pembakaran LPG. Secara matematis, efisiensi boiler dinyatakan sebagai:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{\text{steam}} (h_g - h_f)}{\dot{m}_{\text{fuel}} \times \text{LHV}} \times 100\%$$

dengan:

η = efisiensi boiler (%)
 $\dot{m}_{\text{steam}}$ = laju produksi uap (kg/jam)
 $\dot{m}_{\text{fuel}}$ = laju konsumsi gas LPG (kg/jam)
 LHV = Lower Heating Value
 (energi pembakaran bawah) (kJ/kg)
 h_g = entalpi uap jenuh pada tekanan operasi boiler (kJ/kg)
 h_f = entalpi air umpan pada kondisi masuk boiler (kJ/kg)

Nilai $\dot{m}_{\text{steam}}$ dan $\dot{m}_{\text{fuel}}$ diperoleh dari hasil pengujian sistem yaitu data laju massa terhadap waktu. Sementara itu, parameter termodinamika h_g ditentukan berdasarkan tabel uap jenuh (steam table) pada tekanan operasi boiler P, sedangkan h_f ditentukan berdasarkan kondisi air umpan yang mengacu pada temperatur air umpan atau kondisi referensi yang digunakan pada pengujian.

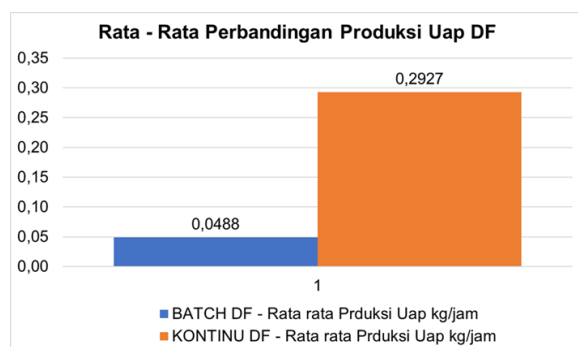
Nilai LHV LPG pada penelitian ini menggunakan data standar, yaitu 11.254,61 kcal/kg, kemudian dikonversi ke satuan kJ/kg agar konsisten dengan satuan entalpi. Konversi dilakukan menggunakan faktor 1" kcal"=4,1868" kJ" , sehingga: $\text{LHV} = 11.254,61 \times 4,1868 = 47.089,29 \text{ kJ/kg}$

Dengan seluruh parameter dinyatakan dalam satuan yang konsisten, maka efisiensi boiler dihitung untuk setiap kondisi pengujian. Hasil perhitungan efisiensi ini selanjutnya digunakan untuk membandingkan kinerja boiler pada variasi tekanan, setting nyala api, dan kondisi operasi lainnya sesuai rancangan eksperimen.

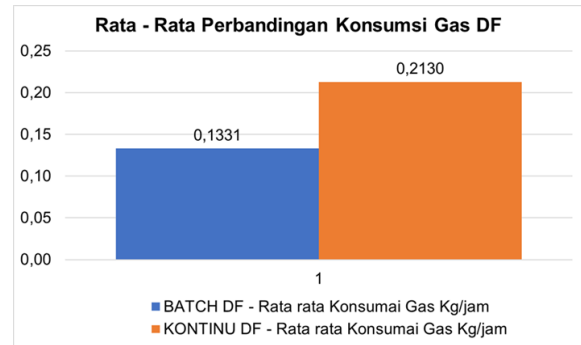
3. Hasil dan Pembahasan

Analisis Desain Faktorial 2³

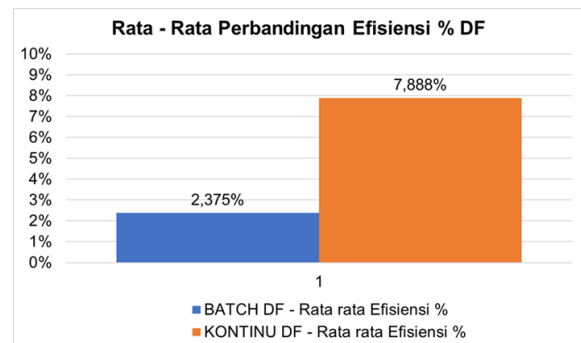
Hasil analisis desain factorial 2³ disajikan pada grafik berikut :



Gambar 2. Grafik Rata – rata perbandingan produksi uap Desain Faktorial 2³



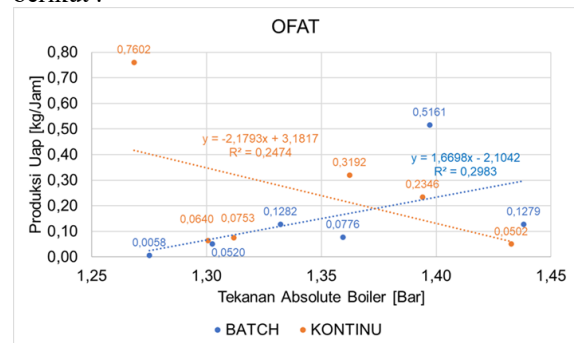
Gambar 3. Grafik Rata – rata perbandingan konsumsi gas Desain Faktorial 2³



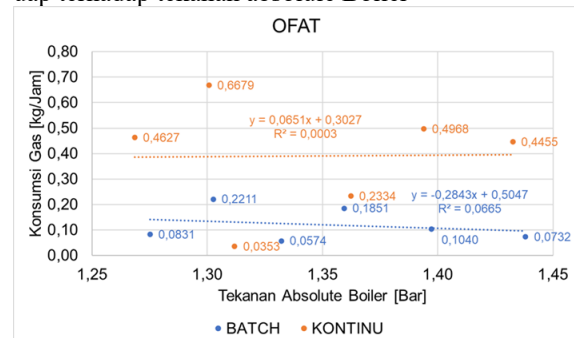
Gambar 4. Grafik Rata – rata perbandingan Efisiensi Desain Faktorial 2³

Analisis OFAT (One Faktor at a Time)

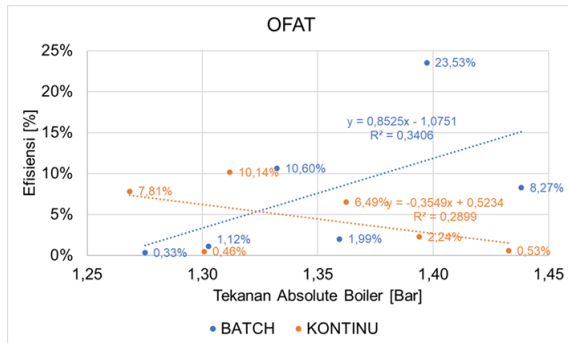
Hasil analisis OFAT disajikan pada grafik berikut :



Gambar 5. Grafik analisis OFAT pengaruh produksi uap terhadap tekanan absolute Boiler



Gambar 6. Grafik analisis OFAT pengaruh konsumsi gas terhadap tekanan absolute Boiler



Gambar 7. Grafik analisis OFAT pengaruh Efisiensi % tekanan absolute Boiler

Kesimpulan

Berdasarkan perancangan sistem, pelaksanaan pengujian, serta pengolahan data menggunakan desain faktorial 2^3 dan metode OFAT, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

Sistem kendali boiler kontinu berhasil dirancang dan diimplementasikan untuk mengatasi kendala utama pada operasi boiler batch, yaitu terhentinya produksi uap ketika air umpan habis.

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan desain faktorial 2^3 , performa rata-rata menunjukkan bahwa boiler kontinu menghasilkan produksi uap lebih tinggi dibanding boiler batch. Nilai rata-rata produksi uap pada sistem kontinu mencapai 0,2927 kg/jam, sedangkan pada sistem batch sebesar 0,0488 kg/jam. Hal ini menegaskan bahwa mode operasi kontinu lebih efektif dalam mempertahankan proses pemanasan dan penguapan sehingga laju produksi uap yang dihasilkan lebih besar.

Peningkatan produksi uap pada boiler kontinu diikuti oleh konsumsi gas LPG rata-rata yang juga lebih besar. Rata-rata konsumsi LPG pada sistem kontinu sebesar 0,2130 kg/jam, sedangkan pada sistem batch sebesar 0,1331 kg/jam. Temuan ini menunjukkan bahwa keluaran uap yang lebih tinggi pada sistem kontinu dicapai dengan kebutuhan energi masukan yang lebih besar, sehingga evaluasi kinerja perlu mempertimbangkan keseimbangan antara output uap dan konsumsi bahan bakar.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rata-rata efisiensi boiler kontinu lebih tinggi dibanding boiler batch. Nilai efisiensi rata-rata sistem kontinu sebesar 7,888%, sedangkan sistem batch sebesar 2,375%. Dengan demikian, meskipun konsumsi LPG pada sistem kontinu lebih besar, pemanfaatan energi masukan untuk menghasilkan uap relatif lebih efektif dibandingkan sistem batch pada rentang kondisi operasi yang diuji.

Hasil analisis pengaruh variabel pada desain faktorial 2^3 menunjukkan adanya perbedaan faktor dominan antara sistem batch dan kontinu. Pada boiler batch, produksi uap paling dipengaruhi oleh volume air umpan, di mana peningkatan volume air umpan dari 10 L menjadi 12,5 L meningkatkan produksi uap

sebesar 0,0352 kg/jam. Sementara itu, pada boiler kontinu, produksi uap dan konsumsi gas paling dipengaruhi oleh setting nyala api, di mana peningkatan nyala api dari 75% menjadi 100% meningkatkan produksi uap sebesar 0,4155 kg/jam dan menaikkan konsumsi gas sebesar 0,1666 kg/jam. Hasil ini mengindikasikan bahwa mekanisme pembentukan uap pada mode kontinu lebih sensitif terhadap suplai panas pembakaran, sedangkan pada mode batch lebih sensitif terhadap ketersediaan massa air umpan.

Pengujian OFAT dilakukan pada enam level tekanan (0,8 s.d. 1,3 bar) untuk melihat pengaruh tekanan terhadap kinerja boiler batch dan kontinu. Pada OFAT boiler batch, produksi uap tertinggi terjadi pada konfigurasi 5 sebesar 0,516 kg/jam, konsumsi gas terendah terjadi pada konfigurasi 3 sebesar 0,0574 kg/jam, dan efisiensi tertinggi juga terjadi pada konfigurasi 5 sebesar 23,53%. Sementara itu, pada OFAT boiler kontinu, produksi uap tertinggi terjadi pada konfigurasi 1 sebesar 0,7602 kg/jam, konsumsi gas terendah terjadi pada konfigurasi 3 sebesar 0,0353 kg/jam, dan efisiensi tertinggi terjadi pada konfigurasi 3 sebesar 10,14%.

Secara umum, penelitian ini membuktikan bahwa sistem boiler kontinu yang dirancang mampu meningkatkan kontinuitas operasi serta memberikan performa produksi uap dan efisiensi rata-rata yang lebih baik dibanding sistem batch pada rentang pengujian, meskipun dengan konsekuensi konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi. Hasil desain faktorial dan OFAT juga menunjukkan bahwa strategi optimasi untuk masing-masing sistem berbeda: pada batch lebih efektif melalui pengaturan volume air umpan, sedangkan pada kontinu melalui pengaturan nyala api dan kombinasinya dengan variabel operasi lain.

Daftar Pustaka

- N. Mehtari, M. Kahani, and M. Zamen, "Energy, environmental, and economic analysis of a new configuration multi-stage flash distillation unit coupled with steam power plant," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 50, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103456.
- P. Chandra, A. Mudgal, J. Patel, and V. K. Patel, "Thermo-economical modeling and multi-objective optimization of thermal energy driven multiple effect distillation system for water treatment using NSGA-II Algorithm," *Desalination Water Treat*, vol. 320, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100646.
- C. Cui, X. Zhang, M. Qi, H. Lyu, J. Sun, and A. A. Kiss, "Fully electrified heat pump assisted distillation process by flash vapour circulation," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 206, pp. 280–284, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.cherd.2024.05.011.
- Q. Chen et al., "A zero liquid discharge system integrating multi-effect distillation and evaporative crystallization for desalination brine treatment," *Desalination*, vol. 502, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.desal.2020.114928.
- S. Aly, H. Manzoor, S. Simson, A. Abotaleb, J. Lawler, and A. N. Mabrouk, "Pilot testing of a novel Multi Effect Distillation (MED) technology for seawater desalination," *Desalination*, vol. 519, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.desal.2021.115221.
- S. Aly, J. Jawad, H. Manzoor, S. Simson, J. Lawler, and A. N. Mabrouk, "Pilot testing of a novel integrated Multi Effect Distillation - Absorber compressor (MED-AB) technology for high performance seawater desalination," *Desalination*, vol. 521, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.desal.2021.115388.
- J. Choi, J. Cho, J. Shin, H. Cha, J. Jung, and K. G. Song, "Performance and economic analysis of a solar membrane distillation pilot plant under various operating conditions," *Energy Convers Manag*, vol. 268, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115991.
- B. Dilli and S. V. S. P. Kumar, "Solar parallel feed multi effect distillation plant: An experimental study," *Desalination Water Treat*, vol. 317, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100147.
- A. Giwa, N. Akther, A. Al Housani, S. Haris, and S. W. Hasan, "Recent advances in humidification dehumidification (HDH) desalination processes: Improved designs and productivity," May 01, 2016, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.108.
- P. Chandra, A. Mudgal, J. Patel, and V. K. singh, "Effect of feed water temperature on the performance and economics of thermal energy driven multiple effect distillation system for water treatment," *Hybrid Advances*, vol. 6, p. 100179, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.hybadv.2024.100179.
- E. Koswara et al., "Design and Control of Boiler Systems for Enhanced Performance in Mini-MED Applications," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 43, no. 1, pp. 353–360, Feb. 2025, doi: 10.18280/ijht.430136.