E-ISSN : 3025-1311
https://ejournal.cahayailmubangsa.institute/index.php/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 11 No 5 Tahun 2026

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN BOILER STEAM PARAMETER VARIATIONS AND THE ACTUAL POWER OF WASTE HEAT RECOVERY POWER GENERATION (WHRPG) IN A CEMENT PLANT

Saif Akhtar Ramadhan*, Andre Kurniawan, Arwizet K, Yolli Fernanda
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang, Indonesia

*Corresponding author: saifakhtarramadhan031103@gmail.com

Abstract

The Waste Heat Recovery Power Generation (WHRPG) system at the Indarung V Unit of PT Semen Padang converts waste heat into electricity through the Suspension Preheater (SP) Boiler and the Air Quenching Cooler (AQC) Boiler, yet its actual output remains below its theoretical potential. This study analyzes the relationship between steam parameter variations from both Boilers and the actual generator power, determines the steam flow contribution of each Boiler, and evaluates the agreement between calculated turbine power and recorded generator power. A quantitative descriptive-analytical approach was applied to hourly historical data from the Distributed Control System (DCS) for 1–15 August 2026. After removing six disturbance observations, 354 of 360 were retained. The data were analyzed using descriptive statistics, the coefficient of variation (CV), Pearson correlation with significance testing, and an enthalpy-based turbine power calculation with an isentropic efficiency of 78.64%. Steam flow varied the most, with CVs of 27.21% for the SP Boiler and 30.41% for the AQC Boiler, whereas pressure was relatively stable. The AQC Boiler contributed 55.22% of the total steam supply. All six parameter pairs correlated significantly with generator power ($p < 0.05$), and AQC steam flow showed the strongest correlation ($r = 0.725$; $R^2 = 52.57\%$). The calculated turbine power averaged 5.163 MW against 4.897 MW of actual generator power (MAPE of 6.81%; R^2 of 92.01%) when the inlet pressure was treated as absolute. The AQC Boiler is therefore a priority for operational monitoring, although the results describe a bivariate statistical association, not causation.

Keywords: *WHRPG; AQC Boiler; SP Boiler; Steam Parameters; Pearson Correlation*

Abstrak

Sistem *Waste Heat Recovery Power Generation* (WHRPG) di Unit Indarung V PT Semen Padang mengubah panas buang menjadi listrik melalui *Boiler Suspension Preheater* (SP) dan *Boiler Air Quenching Cooler* (AQC), tetapi daya aktualnya masih berada di bawah potensi teoritis yang dilaporkan penelitian sebelumnya. Penelitian ini bertujuan menganalisis hubungan variasi parameter uap kedua *boiler* terhadap daya aktual generator, menentukan kontribusi laju alir uap masing-masing *boiler*, serta mengevaluasi kesesuaian daya turbin hasil perhitungan termodinamika dengan daya generator aktual. Pendekatan yang digunakan adalah kuantitatif deskriptif-analitik terhadap data historis per jam dari *Distributed Control System* (DCS) pada 1–15 Agustus 2026. Setelah enam observasi gangguan dikeluarkan, 354 dari 360 observasi digunakan. Data dianalisis dengan statistik deskriptif, koefisien variasi (CV), korelasi Pearson beserta uji signifikansi, dan perhitungan daya turbin berbasis entalpi dengan efisiensi isentropik 78,64%. Laju alir uap memiliki variasi terbesar, dengan CV 27,21% pada *Boiler* SP dan 30,41% pada *Boiler* AQC,

Article History
Received: Oktober 2026
Reviewed: Oktober 2026
Published: Oktober 2026

Plagiarism Checker
No 237.u873247.fh8374

Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

sedangkan tekanan relatif stabil. *Boiler* AQC menyumbang 55,22% total pasokan uap. Keenam pasangan parameter berkorelasi signifikan dengan daya generator ($p < 0,05$), dan laju alir AQC memiliki korelasi terkuat ($r = 0,725$; $R^2 = 52,57\%$). Daya turbin hasil perhitungan rata-rata 5,163 MW, dibandingkan 4,897 MW daya generator aktual (MAPE 6,81%; R^2 92,01%) ketika tekanan masuk dianggap absolut. Dengan demikian, *Boiler* AQC menjadi prioritas pemantauan operasional, dengan catatan bahwa hasilnya merupakan asosiasi statistik bivariat, bukan hubungan sebab-akibat.
Kata kunci: WHRPG; *Boiler* AQC; *Boiler* SP; Parameter Uap; Korelasi Pearson

I. PENDAHULUAN

Industri semen termasuk sektor dengan konsumsi energi tertinggi karena prosesnya membutuhkan pemanasan bahan baku pada temperatur tinggi dan pendinginan klinker. Konsumsi energi sektor ini diperkirakan mencapai 2%–8% dari total energi global, dengan kebutuhan spesifik 2,94–6,28 GJ energi termal dan 65–141 kWh energi listrik untuk setiap ton semen (Marenco-Porto *et al.*, 2023). Tingginya kebutuhan tersebut menjadikan efisiensi energi penting untuk menekan biaya operasi, meningkatkan daya saing, dan mendukung keberlanjutan industri.

Proses produksi semen melepaskan panas buang dalam jumlah besar, terutama dari gas buang *preheater* dan udara panas *clinker cooler*, yang dapat mencapai sekitar 40% dari total energi proses (Khater *et al.*, 2021). Teknologi *Waste Heat Recovery Power Generation* (WHRPG) memanfaatkan panas tersebut untuk membangkitkan listrik melalui siklus uap tanpa tambahan bahan bakar. Penerapannya menekan pembelian listrik eksternal sekaligus emisi karbon (Khater *et al.*, 2021).

PT Semen Padang membangun WHRPG di Unit Indarung V dengan pendanaan dari pemerintah Jepang melalui NEDO (Harun & Yandri, 2020). Pembangkit ini berkapasitas maksimal sekitar 8,5 MW dan memakai dua *boiler*, yaitu *Boiler Suspension Preheater* (SP) dan *Boiler Air Quenching Cooler* (AQC), untuk menghasilkan uap penggerak turbin (Wincy, 2023). Namun, kinerja aktual sistem belum optimal. Daya listrik aktual yang dilaporkan hanya sekitar 3,70 MW pada periode pengambilan data penelitian tersebut, jauh di bawah potensi daya panas uap teoritis sebesar 19,778 MW (Safira *et al.*, 2023).

Daya keluaran WHRPG bergantung pada kualitas dan kestabilan pasokan uap, yang dicirikan oleh tekanan, temperatur, dan laju alir massa. Keluaran daya sangat sensitif terhadap parameter tersebut, terutama pada sisi tekanan tinggi turbin (Yin *et al.*, 2022). Kondisi operasi aktual juga sering menghasilkan daya yang lebih rendah daripada estimasi desain (Scripcariu *et al.*, 2021). Di PT Semen Padang, aliran gas buang menuju *boiler* sering tidak optimal karena pembagian panas disesuaikan dengan kebutuhan menjaga kualitas klinker dan material pada *preheater*, ditambah kerugian panas radiasi di sepanjang saluran pipa (Wincy, 2023).

Penelitian WHRPG terdahulu umumnya berfokus pada efisiensi termodinamika, optimasi desain, dan simulasi kondisi ideal, termasuk model prediksi daya berbasis jaringan saraf tiruan (Ali *et al.*, 2021). Kajian di PT Semen Padang sejauh ini membahas potensi daya teoritis dan penurunan efisiensi akibat degradasi komponen (Heroza & Pratoto, 2022; Safira *et al.*, 2023). Kajian empiris yang menghubungkan variasi tekanan, temperatur, dan laju alir massa uap dari *Boiler* SP dan *Boiler* AQC dengan daya listrik aktual berdasarkan data operasional nyata masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik variasi parameter uap kedua *boiler*, menentukan kontribusi laju alir uap masing-masing, dan menganalisis hubungan parameter uap

dengan daya aktual generator. Penelitian ini juga mengidentifikasi *boiler* dengan keterkaitan terkuat terhadap daya aktual serta mengevaluasi kesesuaian daya turbin hasil perhitungan termodinamika dengan daya generator aktual. Hasilnya diharapkan menjadi dasar pertimbangan teknis bagi pengendalian operasional PT Semen Padang dan referensi bagi evaluasi kinerja pembangkit panas buang di industri semen.

II. METODE PENELITIAN

1. Jenis Penelitian dan Objek

Penelitian ini bersifat kuantitatif dengan pendekatan deskriptif-analitik dan *noneksperimental*, karena tidak ada perlakuan atau manipulasi terhadap sistem. Objek penelitian adalah sistem WHRPG Unit Indarung V PT Semen Padang, Kota Padang, Sumatera Barat. Data yang dianalisis berupa data sekunder historis operasional dari *Distributed Control System* (DCS).

2. Data dan Seleksi Data

Data dicatat per jam selama 15 hari operasi normal, yaitu 1–15 Agustus 2026, sehingga diperoleh 360 observasi awal untuk setiap variabel. Periode tersebut dipilih berdasarkan log operasional karena tidak mencatat *shutdown* terjadwal, *start-up*, maupun perawatan besar. Variabel penelitian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel dan Sumber Data Penelitian

Kelompok	Parameter	Satuan	Sumber Data
Variabel bebas	Laju alir massa uap *boiler* SP dan AQC	t/jam	DCS *Boiler Desk*
Variabel bebas	Tekanan uap *boiler* SP dan AQC	MPa	DCS *Boiler Desk*
Variabel bebas	Temperatur uap *boiler* SP dan AQC	°C	DCS *Boiler Desk*
Variabel terikat	Daya listrik aktual generator	MW	DCS *Generator Desk*
Data pendukung	Tekanan masuk dan keluar turbin	MPa; kPa	DCS *Turbine Desk*
Data pendukung	Temperatur masuk dan keluar turbin	°C	DCS *Turbine Desk*
Data pendukung	Laju alir uap turbin	t/jam	DCS *Turbine Desk*

Observasi yang kosong, tidak terbaca, menunjukkan terhentinya aliran uap salah satu *boiler*, atau mengandung anomali sensor tidak digunakan dalam analisis. Penyebab gangguan ditelusuri melalui log operasional dan konfirmasi operator.

3. Analisis Statistik

Variasi parameter uap dinyatakan dengan rata-rata, standar deviasi (*SD*), dan koefisien variasi (*CV*) pada Persamaan (1). Kontribusi laju alir uap *boiler* SP terhadap total pasokan dihitung dengan Persamaan (2), sedangkan kontribusi *boiler* AQC dihitung dengan cara yang sama.

$$\mathrm{CV} = \frac{\mathrm{SD}}{\bar{x}} \times 100\% \qquad (1)$$

$$C_{\mathrm{sp}} = \left[\frac{\sum \dot{m}_{\mathrm{sp}}}{\sum \dot{m}_{\mathrm{sp}} + \sum \dot{m}_{\mathrm{aqc}}}\right] \times 100\% \qquad (2)$$

Hubungan setiap parameter uap dengan daya generator diukur menggunakan koefisien korelasi Pearson (r) pada Persamaan (3), dengan x adalah parameter uap, y adalah daya generator, dan n adalah jumlah observasi. Kekuatan hubungan diinterpretasikan menurut Mukaka (2012), dan koefisien determinasi (R^2) dihitung dari r^2. Signifikansi diuji dengan uji t berderajat bebas $n - 2$ pada $\alpha = 0{,}05$ (Di Leo & Sardanelli, 2020).

$$r = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (3)$$

Boiler dominan diidentifikasi dari empat indikator. Besar $|r|$ dan *p-value* menjadi dasar utama, sedangkan kontribusi laju alir dan *CV* menjadi informasi pendukung.

4. Perhitungan Daya Turbin

Entalpi dan entropi uap masuk turbin (h_1 dan s_1) ditentukan dari tekanan dan temperatur masuk menggunakan pustaka *CoolProp* berbasis IAPWS-IF97 (Bell *et al.*, 2014). Hasilnya diverifikasi terhadap interpolasi tabel sifat uap (Cengel & Boles, 2015). Tekanan keluar turbin yang tercatat sebagai vakum dikonversi menjadi tekanan absolut dengan tekanan atmosfer 101,325 kPa. Entalpi keluar aktual (h_2) ditentukan dengan efisiensi isentropik turbin (η_t) sebesar 78,64% dari Safira *et al.* (2023), dan daya turbin dihitung dengan mengabaikan perubahan energi kinetik dan potensial karena datanya tidak tersedia.

$$h_2 = h_1 - \eta_t\,(h_1 - h_{2s}) \quad (4)$$

$$\dot{W}_t = \dot{m}\,(h_1 - h_2) \quad (5)$$

Tekanan masuk turbin tercatat konstan 1,11 MPa tanpa keterangan basis tekanan, sehingga dihitung dua skenario: Skenario A (tekanan absolut) dan Skenario B (tekanan *gauge*, setara 1,211325 MPa absolut). Kesesuaian daya turbin dengan daya generator dievaluasi dari galat pada observasi ke-i, yaitu $e_i = \hat{y}_i - y_i$, dengan $\hat{y}$ daya turbin hasil perhitungan dan y daya generator aktual pada jam yang sama. Ukuran yang digunakan adalah *mean error* (ME) dan galat relatifnya (ME%) pada Persamaan (6) dan (7), *mean absolute error* (MAE) pada Persamaan (8), *root mean square error* (RMSE) pada Persamaan (9), dan *mean absolute percentage error* (MAPE) pada Persamaan (10) (Chai & Draxler, 2014; Hyndman & Koehler, 2006), serta korelasi Pearson dan R^2.

$$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_i \quad (6)$$

$$ME_{\%} = \frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{e_i}{y_i} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |e_i| \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_i^2} \quad (9)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{|e_i|}{|y_i|} \quad (10)$$

III. HASIL PENELITIAN

1. Seleksi Data

Dari 360 observasi awal, enam observasi dikeluarkan karena salah satu *boiler* tidak mengalirkan uap, sehingga 354 observasi digunakan sebagai data operasi normal. Empat observasi berasal dari *boiler* AQC yang berhenti, yaitu tiga observasi pada Hari ke-2 (perbaikan pipa bocor, berdasarkan konfirmasi lisan operator) dan satu observasi pada Hari ke-3 (penggantian *safety pin* dan *chain* yang patah, berdasarkan log operasional). Dua observasi

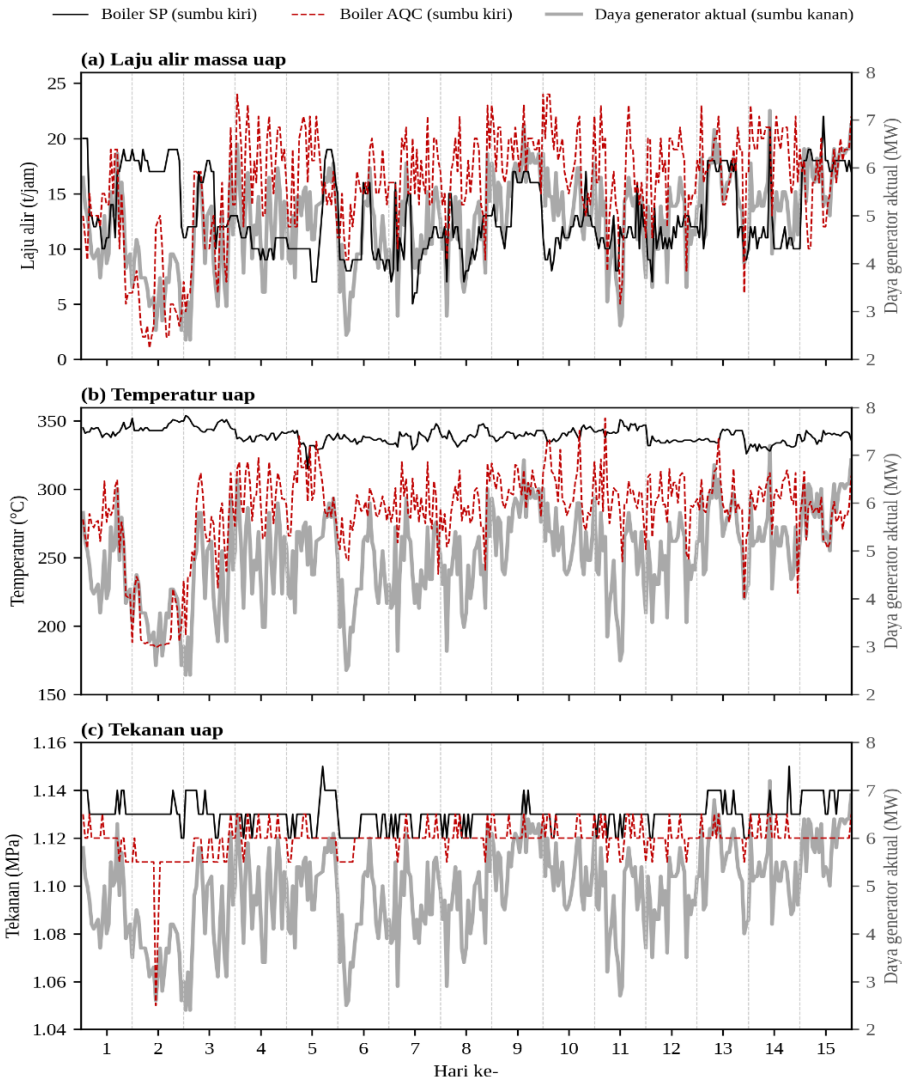
lainnya berasal dari *boiler* SP yang berhenti pada Hari ke-5 akibat masalah *gearbox* (log operasional).

2. Karakteristik Variasi Parameter Uap

Statistik deskriptif parameter uap disajikan pada Tabel 2, dan tren seluruh parameter bersama daya generator aktual ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 2. Statistik Deskriptif Parameter Uap (n = 354)

Parameter	Min.	Maks.	Rata-rata	SD	CV (%)
Laju alir SP (t/jam)	5	22	12,81	3,48	27,21
Temperatur SP (°C)	315	354	339,49	5,24	1,54
Tekanan SP (MPa)	1,12	1,15	1,130	0,0056	0,49
Laju alir AQC (t/jam)	1	24	15,79	4,80	30,41
Temperatur AQC (°C)	184	352	283,16	30,58	10,80
Tekanan AQC (MPa)	1,05	1,13	1,120	0,0066	0,59



Gambar 1. Tren Parameter Uap (a: Laju Alir Massa, b: Temperatur, c: Tekanan) dan Daya Generator Aktual selama 15 Hari Pengamatan

Laju alir *boiler* AQC berada pada rentang 1–24 t/jam, lebih lebar daripada *boiler* SP yang berada pada 5–22 t/jam. Temperatur SP relatif stabil pada 315–354 °C, sedangkan temperatur AQC berubah lebih besar pada 184–352 °C. Tekanan kedua *boiler* berada pada rentang sempit, yaitu 1,12–1,15 MPa untuk SP dan 1,05–1,13 MPa untuk AQC. Mulai akhir Hari ke-1 hingga awal Hari ke-3, laju alir dan temperatur AQC rendah selama sekitar 32 jam, yang menurut operator disebabkan material pada *kiln* yang habis, dan daya generator aktual ikut turun ke nilai terendah pada periode tersebut.

Total laju alir uap *boiler* SP selama pengamatan adalah 4.534 t (44,78%), sedangkan *boiler* AQC sebesar 5.591 t (55,22%), dengan total 10.125 t.

3. Hubungan Parameter Uap dengan Daya Generator Aktual

Hasil korelasi Pearson antara enam parameter uap dan daya generator aktual disajikan pada Tabel 3. Seluruh pasangan parameter memiliki *p-value* di bawah 0,05.

Tabel 3. Korelasi Parameter Uap terhadap Daya Generator Aktual (n = 354)

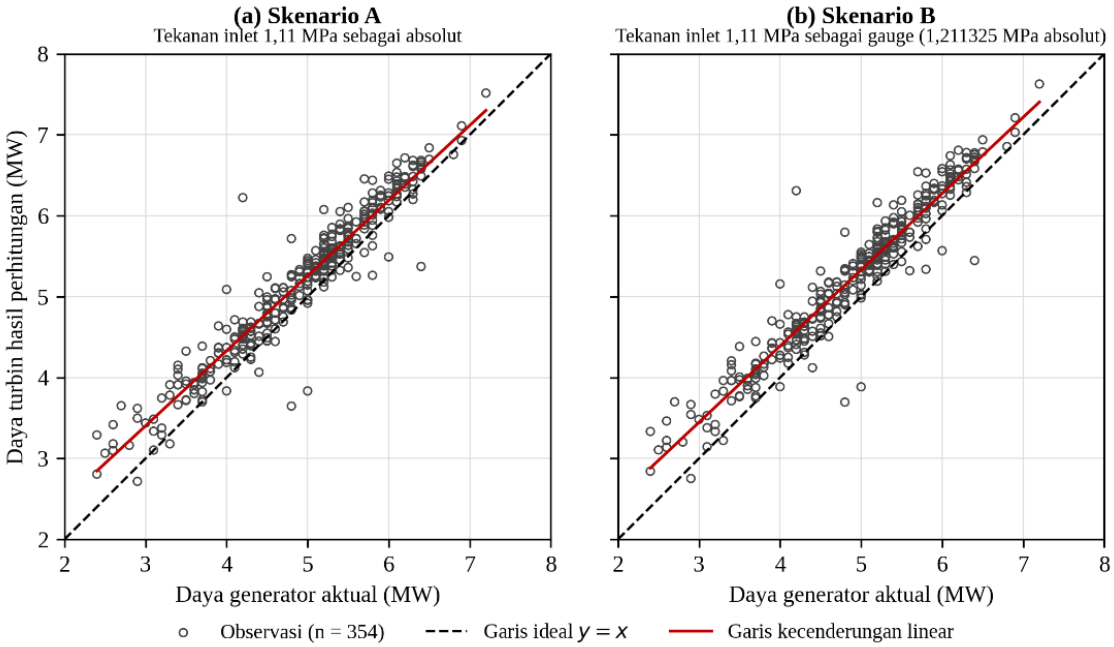
Parameter	*Boiler*	Pearson *r*	R^2 (%)	*p-value*
Laju alir	SP	0,3704	13,72	$5{,}92\times10^{-13}$
Temperatur	SP	−0,2363	5,58	$7{,}01\times10^{-6}$
Tekanan	SP	0,5065	25,66	$1{,}81\times10^{-24}$
Laju alir	AQC	0,7250	52,57	$5{,}67\times10^{-59}$
Temperatur	AQC	0,6480	41,99	$1{,}57\times10^{-43}$
Tekanan	AQC	0,6231	38,83	$1{,}85\times10^{-39}$

4. Daya Turbin Hasil Perhitungan

Sebagai verifikasi pada data Hari ke-1 pukul 07:00, daya turbin hasil interpolasi tabel (5,762 MW) berbeda 0,07% dari hasil CoolProp (5,758 MW). Perbandingan daya turbin hasil perhitungan dengan daya generator aktual pada 354 observasi disajikan pada Tabel 4 dan Gambar 2.

Tabel 4. Perbandingan Daya Turbin Hasil Perhitungan dan Daya Generator Aktual

Parameter	Skenario A	Skenario B
Rata-rata daya turbin (MW)	5,163	5,234
Rata-rata daya generator (MW)	4,897	4,897
***Mean error* (MW)**	0,266	0,337
***Mean error* (%)**	6,03	7,48
MAE (MW)	0,306	0,368
RMSE (MW)	0,375	0,429
MAPE (%)	6,81	8,07
Pearson *r*	0,9592	0,9593
R^2 (%)	92,01	92,03



Gambar 2. Perbandingan Daya Turbin Hasil Perhitungan dan Daya Generator Aktual pada Skenario A dan Skenario B

IV. PEMBAHASAN

Laju alir uap menjadi parameter dengan variasi relatif terbesar pada kedua *boiler* (*CV* 27,21% pada SP dan 30,41% pada AQC), sedangkan tekanan relatif stabil (*CV* di bawah 0,6%). Temperatur AQC juga bervariasi cukup besar (*CV* 10,80%) dibandingkan SP (*CV* 1,54%). Penurunan laju alir dan temperatur AQC pada Hari ke-1 hingga Hari ke-3 yang diikuti turunnya daya generator pada Gambar 1 sejalan dengan kuatnya korelasi parameter AQC pada Tabel 3.

Menurut kriteria Mukaka (2012), laju alir AQC (r = 0,725) berkorelasi tinggi dengan daya generator, sedangkan temperatur AQC (r = 0,648), tekanan AQC (r = 0,623), dan tekanan SP (r = 0,507) berkorelasi sedang. Laju alir SP (r = 0,370) berkorelasi rendah, dan temperatur SP (r = −0,236) berada pada kategori dapat diabaikan dengan arah negatif. Nilai $|r|$ seluruh parameter AQC (0,623–0,725) lebih besar daripada seluruh parameter SP (0,236–0,507). Karena keenam pasangan sama-sama signifikan, *p-value* tidak membedakan kedua *boiler*, dan perbedaannya ditentukan oleh besar $|r|$. Dengan kontribusi laju alir yang lebih besar (55,22%) dan variasi parameter yang lebih besar, *boiler* AQC menjadi *boiler* dengan keterkaitan terkuat terhadap daya aktual pada data ini.

Hasil tersebut perlu ditafsirkan dengan hati-hati. Korelasi bersifat bivariat sehingga tidak membuktikan hubungan sebab-akibat dan tidak memisahkan pengaruh antarparameter yang saling berkaitan. Nilai R^2 sebesar 52,57% pada laju alir AQC berarti sekitar separuh variasi daya generator berhubungan linear dengan parameter itu, bukan bahwa separuh daya ditentukan olehnya. Korelasi tekanan yang signifikan terjadi pada rentang tekanan yang sempit, dan korelasi negatif temperatur SP tidak dapat ditafsirkan sebagai penurunan daya akibat naiknya temperatur.

Perhatian terhadap *boiler* AQC sejalan dengan temuan Heroza dan Pratoto (2022) bahwa eksergi termusnahkan terbesar terdapat pada *boiler* tersebut, meskipun kedua temuan mengukur aspek yang berbeda dan tidak dapat dibandingkan langsung. Perubahan kinerja *boiler* selama masa operasi (Wincy, 2023) memperkuat alasan penggunaan data operasional aktual per jam dibandingkan nilai desain, sebagaimana juga ditekankan oleh Scripcariu *et al.* (2021).

Perhitungan termodinamika memberikan pendekatan fisik terhadap hubungan tersebut. Rata-rata daya turbin hasil perhitungan (5,163 MW pada Skenario A dan 5,234 MW pada Skenario B) lebih tinggi daripada rata-rata daya generator aktual (4,897 MW), dengan MAPE 6,81% dan 8,07%. Selisih ini tidak otomatis menunjukkan kesalahan model, karena rugi-rugi mekanis dan efisiensi generator tidak dimodelkan secara eksplisit. Koefisien determinasi sekitar 92% pada kedua skenario menunjukkan bahwa daya turbin hasil perhitungan mengikuti pola perubahan daya generator dengan sangat kuat, tetapi nilai tersebut menyatakan kekuatan hubungan linear, bukan tingkat akurasi.

Kesesuaian ini mendukung penggunaan efisiensi isentropik 78,64% dari Safira *et al.* (2023), meskipun nilai tersebut berasal dari penelitian yang terbit tiga tahun sebelum periode pengamatan dan tidak diukur langsung sehingga tidak dapat dianggap sebagai bukti efisiensi aktual turbin. Pada Gambar 2, sebagian kecil observasi menyimpang lebih jauh dari garis ideal. Dua dari lima selisih terbesar bertepatan dengan reposisi *drag chain* pada Hari ke-3 pukul 11:00 dan 12:00. Perubahan basis tekanan masuk mengubah besar selisih, tetapi tidak mengubah pola hubungan antara daya turbin hasil perhitungan dan daya generator.

Penelitian ini memiliki empat keterbatasan. Pertama, data hanya mencakup 15 hari pada satu periode sehingga hasil berlaku untuk kondisi operasi normal selama periode tersebut. Kedua, efisiensi isentropik diacu dari literatur. Ketiga, basis tekanan masuk turbin tidak diketahui dan tekanan atmosfer diasumsikan 101,325 kPa. Keempat, analisis korelasi bersifat bivariat.

V. KESIMPULAN

Laju alir uap merupakan parameter dengan variasi terbesar pada kedua *boiler*, sedangkan tekanan relatif stabil. *Boiler* AQC menyumbang 55,22% total pasokan uap dan *boiler* SP menyumbang 44,78%. Seluruh enam pasangan parameter uap berhubungan signifikan dengan daya generator aktual ($p < 0,05$). Hubungan terkuat adalah laju alir AQC ($r = 0,725$), dan seluruh parameter AQC memiliki $|r|$ lebih besar daripada parameter SP, sehingga *boiler* AQC memiliki keterkaitan paling kuat dengan daya aktual, sebagai hubungan statistik dan bukan sebab-akibat. Daya turbin hasil perhitungan dengan efisiensi isentropik 78,64% cenderung lebih tinggi daripada daya generator aktual, dengan MAPE 6,81% dan R^2 92,01% pada Skenario A serta MAPE 8,07% dan R^2 92,03% pada Skenario B.

Bagi PT Semen Padang, *boiler* AQC dapat diprioritaskan dalam pemantauan dan pertimbangan pengendalian operasional karena keterkaitannya terkuat dengan daya aktual. PT Semen Padang juga disarankan mencatat data dengan interval lebih rapat dari satu jam serta mencatat basis tekanan masuk turbin (absolut atau *gauge*) dan tekanan atmosfer lokal agar analisis lebih akurat. Bagi penelitian selanjutnya, disarankan menggunakan periode pengamatan yang lebih panjang dengan kondisi operasi beragam, mengukur efisiensi isentropik turbin secara langsung dengan memperhitungkan rugi mekanis dan efisiensi generator, serta menerapkan analisis multivariat untuk memisahkan pengaruh masing-masing parameter.

VI. REFERENSI

Ali, A., Kamal, K., Ratlamwala, T. A. H., Fahad Sheikh, M., & Arsalan, M. (2021). Power prediction of waste heat recovery system for a cement plant using back propagation neural network and its thermodynamic modeling. *International Journal of Energy Research*, *45*(6), 9162–9178. https://doi.org/10.1002/er.6444

Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S., & Lemort, V. (2014). Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *53*(6), 2498–2508. https://doi.org/10.1021/ie4033999

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An engineering approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.

Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, *7*(3), 1247–1250. https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014

Di Leo, G., & Sardanelli, F. (2020). Statistical significance: P value, 0.05 threshold, and applications to radiomics—reasons for a conservative approach. *European Radiology Experimental*, *4*(1), 18. https://doi.org/10.1186/s41747-020-0145-y

Harun, N., & Yandri, V. R. (2020). Pemanfaatan gas buang pada Waste Heat Recovery Power Generation untuk dikonversi menjadi energi terbarukan di Indarung V, PT. Semen Padang, Indonesia. *Elektron Jurnal Ilmiah*, *12*(1), 24–27.

Heroza, N., & Pratoto, A. (2022). Analisis eksergi pada pembangkit listrik yang memanfaatkan panas buangan di PT Semen Padang. *TEKNIK*, *43*(2), 131–139. https://doi.org/10.14710/teknik.v43i2.37333

Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, *22*(4), 679–688. https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001

Khater, A. M., Soliman, A., Ahmed, T. S., & Ismail, I. M. (2021). Power generation in white cement plants from waste heat recovery using steam-organic combined Rankine cycle. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *4*, 100138. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100138

Marenco-Porto, C. A., Fierro, J. J., Nieto-Londoño, C., Lopera, L., Escudero-Atehortua, A., Giraldo, M., & Jouhara, H. (2023). Potential savings in the cement industry using waste heat recovery technologies. *Energy*, *279*, 127810. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127810

Mukaka, M. M. (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal*, *24*(3), 69–71.

Safira, M., Latif, M., Zaini, Z., Aulia, A., Muharam, M., & Njeri, W. (2023). Analysis of exhaust gas heat utilization in waste heat recovery power generator at Indarung V factory PT Semen Padang. *Andalas Journal of Electrical and Electronic Engineering Technology*, *3*(1), 23–29. https://doi.org/10.25077/ajeeet.v3i1.34

Scripcariu, M., Gheorghiu, C., Gheorghiu, M., & Dobrica, A. G. (2021). Improving energy performance of a cement manufacturing factory by using waste heat recovery systems, estimated vs. actual achievements. *E3S Web of Conferences*, *286*, 01007. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128601007

Wincy, F. Y. (2023). *Analisis efisiensi boiler pada Waste Heat Recovery Power Generation (WHRPG) PT. Semen Padang* [Tugas akhir sarjana, Universitas Andalas].

Yin, Q., Hu, Z., Tian, H., He, J., & Du, W. (2022). The global performance optimization of the waste heat power generation system in cement industry based on thermal resistance method. *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.4199186