TEKNOTIKA Vol. 8, No. 1, 2025

Analisis Pengaruh Tekanan Uap terhadap Putaran Turbin di Pabrik Minyak Kelapa Sawit (PMKS)

Erik heriyana[1*], sony sukmara[2] ,moh azizi hakim[3],Dhimas Satria[4], Shahnurriman Abdul Rahman[5]

[1,2,3,]Fakultas teknologi dan informatika universitas matlaulanwar banten
[4]Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
[5]Universiti Sains Islam Malaysia
Email: *zeehakim@gmail.com

Abstrak. Turbin uap pada pabrik minyak kelapa sawit memanfaatkan energi uap dari boiler untuk menghasilkan putaran poros dan daya listrik bagi kebutuhan proses. Penelitian ini bertujuan menganalisis hubungan tekanan uap masuk dengan putaran turbin serta membentuk model prediksi sederhana untuk mendukung pengendalian operasi. Metode yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif dengan lima tingkat tekanan, yaitu 16-20 bar, dan lima pengulangan pengukuran pada setiap tingkat. Tekanan diukur menggunakan pressure gauge, sedangkan putaran poros diukur menggunakan tachometer. Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif, korelasi Pearson, dan regresi linear. Data simulasi pada draft menunjukkan bahwa rata-rata putaran meningkat dari 2.660 rpm pada 16 bar menjadi 3.004,4 rpm pada 20 bar. Model regresi yang diperoleh adalah N = 1281,44 + 86,60P dengan koefisien determinasi 0,9714 dan korelasi 0,9856. Hasil ini menunjukkan hubungan positif yang sangat kuat: setiap kenaikan tekanan 1 bar berkaitan dengan peningkatan putaran sekitar 86,60 rpm pada kondisi beban dan bukaan katup yang terkendali. Stabilitas tekanan, governor, laju aliran, dan beban generator tetap harus dipantau agar turbin bekerja aman dan mendekati putaran nominal.

Kata kunci: *tekanan uap; putaran turbin; pabrik kelapa sawit; turbin uap; regresi linear.*

1 Pendahuluan

Pabrik minyak kelapa sawit (PMKS) membutuhkan energi termal dan listrik secara simultan untuk mengoperasikan stasiun perebusan, pengempaan, pemurnian, pengolahan inti, pompa, dan peralatan bantu. Serat dan cangkang hasil proses umumnya dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler [1]. Uap bertekanan yang dihasilkan selanjutnya dialirkan ke turbin untuk menghasilkan daya mekanik dan listrik, sedangkan uap buang bertekanan lebih rendah dapat dimanfaatkan kembali untuk kebutuhan proses [2]. Konfigurasi ini menjadikan sistem boiler-turbin sebagai bagian penting dari cogeneration pada industri kelapa sawit [3].

Turbin uap mengubah penurunan entalpi dan momentum aliran uap menjadi torsi pada poros. Tekanan uap masuk memengaruhi energi yang tersedia pada nosel dan sudu turbin. Dalam batas operasi tertentu, peningkatan tekanan yang disertai laju aliran memadai dapat meningkatkan kecepatan aliran uap, torsi, dan kecenderungan putaran poros. Namun, putaran aktual tidak hanya ditentukan oleh tekanan. Governor, bukaan katup, temperatur uap, tekanan buang, kondisi sudu, rugi-rugi mekanis, rasio gearbox, serta beban generator ikut menentukan respons turbin [4].

Pada operasi PMKS, fluktuasi tekanan dapat terjadi akibat perubahan kualitas bahan bakar, kestabilan pembakaran, kondisi air umpan, permintaan uap proses, dan perubahan kapasitas olah. Tekanan yang terlalu rendah dapat menyebabkan putaran dan frekuensi generator turun, sedangkan tekanan atau putaran yang melampaui batas peralatan meningkatkan risiko trip dan kerusakan. Pemantauan hubungan tekanan-putaran karena itu penting sebagai indikator awal kestabilan sistem pembangkit internal [5].

Penelitian terdahulu telah membahas pemanfaatan biomassa, efisiensi boiler-turbin, dan potensi pemulihan energi uap pada pabrik kelapa sawit. Meskipun demikian, analisis sederhana yang secara khusus memetakan tekanan uap masuk terhadap putaran turbin masih bermanfaat bagi operator dan kegiatan pembelajaran Teknik Mesin. Model empiris dapat digunakan untuk mengidentifikasi penyimpangan, misalnya ketika putaran aktual jauh lebih rendah daripada nilai yang diperkirakan pada tekanan tertentu [6] [7].

Tujuan penelitian ini adalah: (1) mendeskripsikan perubahan putaran turbin pada beberapa tingkat tekanan uap masuk; (2) menentukan kekuatan dan arah hubungan tekanan dengan putaran; dan (3) menyusun persamaan regresi linear sebagai model prediksi awal. Analisis dibatasi pada kondisi operasi relatif tunak dengan bukaan katup, beban generator, dan tekanan buang yang dipertahankan mendekati konstan selama setiap pengukuran .

2 Metode penelitian

Penelitian dirancang menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif. Objek penelitian adalah sistem turbin uap back-pressure pada stasiun pembangkit PMKS. Variabel bebas adalah tekanan uap masuk turbin (P)

dalam bar, sedangkan variabel terikat adalah putaran poros turbin (N) dalam rpm. Variabel kontrol meliputi beban generator, bukaan katup utama, temperatur uap, tekanan exhaust, dan kondisi governor. Diagram alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

Gambar 1. Alur penelitian tekanan uap dan putaran turbin

2.1 Peralatan dan Prosedur Pengukuran

Peralatan utama terdiri atas pressure gauge atau pressure transmitter pada jalur inlet, tachometer nonkontak untuk verifikasi putaran poros, lembar pencatatan operasi, serta data beban generator dari panel. Sebelum pengambilan data, instrumen diperiksa terhadap rentang kerja dan status kalibrasinya. Pengukuran dilakukan setelah turbin mencapai kondisi tunak, yaitu perubahan tekanan dan putaran relatif kecil selama sedikitnya tiga menit.

Tekanan diamati pada lima tingkat, yaitu 16, 17, 18, 19, dan 20 bar. Pada setiap tingkat dilakukan lima pengulangan sehingga diperoleh 25 pasangan data. Interval antar-pengukuran digunakan untuk memastikan pembacaan stabil. Operator juga mencatat kondisi abnormal seperti fluktuasi beban, perubahan katup, kebocoran uap, vibrasi, atau respons governor. Data pada naskah ini merupakan data simulasi yang disusun untuk menunjukkan format analisis. Sebelum dipublikasikan, seluruh nilai harus diganti atau divalidasi menggunakan data pengukuran nyata dan spesifikasi turbin di lokasi penelitian.

2.2 Formulasi Matematis dan Analisis Data

Tekanan merupakan gaya normal per satuan luas dan secara umum dinyatakan dengan Persamaan (1).

$$P = F / A \quad (1)$$

dengan P adalah tekanan (Pa atau bar), F adalah gaya normal (N), dan A adalah luas penampang (m2). Hubungan putaran dengan kecepatan sudut dinyatakan melalui Persamaan (2).

$$omega = 2 \, pi \, N / 60 \quad (2)$$

dengan omega adalah kecepatan sudut (rad/s) dan N adalah putaran poros (rpm). Secara termodinamika, daya turbin ideal dipengaruhi oleh laju aliran massa dan penurunan entalpi. Daya aktual dapat diperkirakan dengan Persamaan (3) [5].

$$W_t = m_dot \, (h_1 - h_2s) \, eta_t \quad (3)$$

dengan W_t adalah daya turbin (kW), m_dot adalah laju aliran massa uap (kg/s), h_1 dan h_2s adalah entalpi masuk dan entalpi keluar isentropik (kJ/kg), serta eta_t adalah efisiensi isentropik turbin. Hubungan empiris tekanan dan putaran dianalisis menggunakan regresi linear.

$$N = a + bP + epsilon \quad (4)$$

Parameter a adalah intersep, b adalah perubahan putaran untuk setiap kenaikan tekanan 1 bar, dan epsilon adalah residual. Kekuatan hubungan linear dinilai menggunakan koefisien korelasi Pearson r dan koefisien determinasi R2. Interpretasi hubungan menggunakan nilai absolut r: 0,00-0,19 sangat lemah; 0,20-0,39 lemah; 0,40-0,59 sedang; 0,60-0,79 kuat; dan 0,80-1,00 sangat kuat.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengukuran

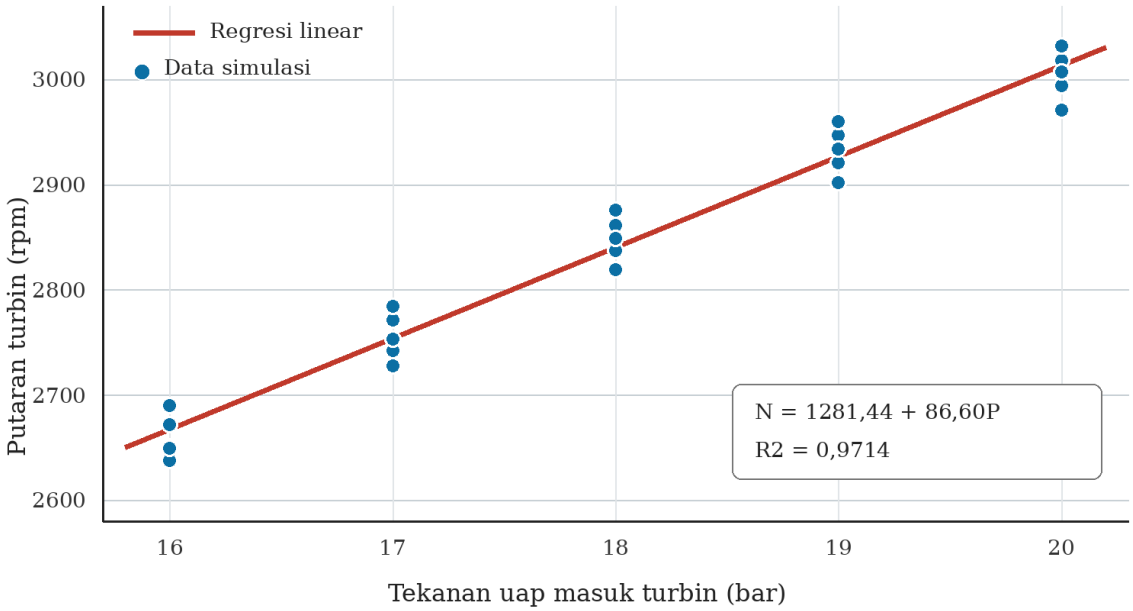
Tabel 1 menyajikan lima pengulangan putaran pada setiap tingkat tekanan. Nilai rata-rata meningkat secara bertahap seiring kenaikan tekanan uap masuk.

Tabel 1. Data tekanan uap dan putaran turbin

Tekanan (bar)	U1 (rpm)	U2 (rpm)	U3 (rpm)	U4 (rpm)	U5 (rpm)	Rata-rata (rpm)	SD (rpm)
16	2638	2672	2651	2690	2649	2660,0	20,80
17	2728	2771	2742	2784	2753	2755,6	22,35
18	2819	2861	2837	2876	2849	2848,4	21,88

Tekanan (bar)	U1 (rpm)	U2 (rpm)	U3 (rpm)	U4 (rpm)	U5 (rpm)	Rata-rata (rpm)	SD (rpm)
19	2902	2947	2921	2960	2934	2932,8	22,53
20	2971	3018	2994	3032	3007	3004,4	23,33

Pada tekanan 16 bar, rata-rata putaran adalah 2.660 rpm dengan simpangan baku 20,80 rpm. Putaran meningkat menjadi 2.755,6 rpm pada 17 bar, 2.848,4 rpm pada 18 bar, 2.932,8 rpm pada 19 bar, dan 3.004,4 rpm pada 20 bar. Simpangan baku pada setiap kelompok berada pada rentang 20,80-23,33 rpm, yang menunjukkan penyebaran pengukuran relatif kecil dibandingkan nilai rata-ratanya.



Gambar 2. Hubungan tekanan uap masuk dengan putaran turbin

3.2 Analisis Korelasi dan Regresi

Hasil analisis memberikan koefisien korelasi r = 0,9856. Nilai tersebut menunjukkan hubungan positif yang sangat kuat antara tekanan uap dan putaran turbin pada rentang pengamatan. Koefisien determinasi R2 = 0,9714 berarti sekitar 97,14% variasi putaran pada data simulasi dapat dijelaskan oleh perubahan tekanan, sedangkan 2,86% sisanya berkaitan

dengan variasi pengukuran atau faktor operasi lain yang tidak dimasukkan ke dalam model.

$$N = 1281{,}44 + 86{,}60P \quad (5)$$

Persamaan (5) menunjukkan bahwa kenaikan tekanan uap 1 bar berkaitan dengan peningkatan putaran rata-rata sekitar 86,60 rpm. Intersep 1.281,44 rpm hanya merupakan parameter matematis dan tidak boleh ditafsirkan sebagai putaran turbin pada tekanan nol karena model hanya berlaku pada rentang 16-20 bar dan kondisi operasi yang sebanding.

3.3 Pembahasan Mekanis dan Operasional

Kecenderungan peningkatan putaran dapat dijelaskan melalui proses ekspansi uap. Tekanan masuk yang lebih tinggi menyediakan potensi penurunan entalpi dan energi aliran yang lebih besar. Nosel mengubah sebagian energi tekanan menjadi energi kinetik, kemudian perubahan momentum pada sudu menghasilkan gaya tangensial dan torsi pada rotor. Jika beban dan bukaan katup relatif tetap, peningkatan torsi mempercepat rotor sampai tercapai keseimbangan baru antara torsi penggerak dan torsi tahanan [5], [6].

Hasil tersebut selaras dengan karakteristik sistem cogeneration PMKS yang umumnya mengalirkan uap boiler bertekanan lebih tinggi menuju turbin dan menggunakan uap exhaust bertekanan lebih rendah untuk proses. Kajian pada pabrik kelapa sawit menunjukkan bahwa uap masuk turbin dapat berada pada kisaran sekitar 17-20 bar, sedangkan uap keluar dimanfaatkan pada tekanan proses yang lebih rendah [3]. Penelitian lain melaporkan sistem boiler-turbin PMKS dengan tekanan inlet 20 bar untuk pembangkitan 800 kW [8]. Angka tersebut bukan batas universal karena setiap turbin memiliki desain, kapasitas, dan kurva operasi tersendiri.

Hubungan tekanan-putaran tidak selalu linear pada seluruh daerah operasi. Ketika generator telah tersinkronisasi, governor akan mengatur aliran uap untuk mempertahankan putaran dan frekuensi mendekati nilai nominal. Pada kondisi tersebut, tambahan tekanan lebih mungkin terlihat sebagai kenaikan kemampuan menanggung beban daripada kenaikan putaran yang besar. Sebaliknya, pada start-up atau kondisi belum tersinkronisasi, perubahan tekanan dapat menghasilkan respons putaran yang lebih jelas. Karena itu, status sinkronisasi dan beban harus selalu dicatat agar interpretasi data tidak keliru.

Penyimpangan dari model regresi dapat digunakan sebagai petunjuk awal gangguan. Putaran yang lebih rendah dari prediksi pada tekanan normal dapat berkaitan dengan peningkatan beban, bukaan katup tidak memadai, endapan pada nosel atau sudu, rugi mekanis pada bearing dan gearbox, kualitas uap rendah, tekanan exhaust tinggi, atau ketidakakuratan instrumen. Sebaliknya, putaran yang terlalu tinggi memerlukan pemeriksaan governor dan sistem overspeed trip. Diagnosis akhir tetap harus mengikuti manual pabrikan, prosedur K3, dan pemeriksaan teknis menyeluruh.

3.4 Implikasi Pemeliharaan dan Pengendalian

Untuk menjaga kestabilan tekanan dan putaran, PMKS perlu menerapkan pencatatan tren tekanan inlet, temperatur uap, laju aliran, tekanan exhaust, beban listrik, frekuensi, vibrasi, dan temperatur bearing. Data historis memungkinkan pembentukan baseline untuk setiap kondisi beban. Pressure transmitter dan tachometer perlu dikalibrasi secara berkala, sementara governor, steam valve, overspeed trip, sistem pelumasan, dan kondisi sudu diperiksa sesuai jadwal preventive maintenance.

Pengendalian boiler juga perlu memperhatikan kontinuitas pasokan serat-cangkang, rasio udara pembakaran, kualitas air umpan, kebersihan permukaan perpindahan panas, dan kestabilan drum level. Kinerja sistem tidak boleh dinilai dari tekanan saja. Tekanan tinggi dengan laju aliran rendah atau temperatur yang tidak sesuai belum tentu menghasilkan daya turbin yang optimal. Oleh sebab itu, model tekanan-putaran pada penelitian ini diposisikan sebagai alat pemantauan awal, bukan pengganti analisis termodinamika dan prosedur operasi pabrikan.

3.5 Keterbatasan Penelitian

Naskah ini menggunakan data simulasi karena data lapangan, identitas turbin, rasio gearbox, kurva performa pabrikan, dan kondisi beban belum diberikan. Model hanya menggambarkan hubungan empiris dua variabel pada rentang 16-20 bar. Penelitian lapangan perlu menambahkan temperatur dan kualitas uap, laju aliran massa, tekanan exhaust, daya generator, konsumsi uap spesifik, serta efisiensi isentropik. Pengambilan data juga sebaiknya dilakukan pada beberapa tingkat beban dan periode operasi agar model lebih representatif.

4 Kesimpulan

Berdasarkan data simulasi, tekanan uap masuk mempunyai hubungan positif yang sangat kuat dengan putaran turbin. Rata-rata putaran meningkat dari 2.660 rpm pada 16 bar menjadi 3.004,4 rpm pada 20 bar. Persamaan regresi N = 1281,44 + 86,60P menghasilkan r = 0,9856 dan R2 = 0,9714. Dalam rentang analisis, kenaikan tekanan 1 bar berkaitan dengan kenaikan putaran sekitar 86,60 rpm ketika kondisi beban, bukaan katup, dan tekanan buang relatif terkendali. Tekanan uap perlu dijaga stabil, tetapi penilaian kinerja harus tetap mempertimbangkan governor, laju aliran, temperatur uap, beban generator, tekanan exhaust, dan kondisi mekanis turbin. Data dan model pada draft ini wajib diverifikasi dengan pengukuran nyata sebelum digunakan sebagai dasar keputusan operasional atau publikasi.

5 Daftar Pustaka

[1] E. Heriana, M. A. Hakim, A. Ekoprianto, S. Sukmara, and D. Susanto, "Analisis Kapasitas Baterai Dan Sistem Charger," *Technoma*, vol. 02, no. 01, 2022.

[2] M. A. Hakim, E. Heriana, A. Ekoprianto, S. Sukmara, and D. Susanto, "Analisis Bangun Rangka Mobil," *Technoma*, vol. 02, no. 01, pp. 3–8, 2022.

[3] M. A. Hakim, E. Heriana, A. Ekoprianto, S. Sukmara, and D. Susanto, "RANCANGAN SISTEM PENGEMUDI JENIS RACK AND," vol. 01, no. 02, 2022.

[4] R. Rizky, M. Ridwan, and Z. Hakim, "Implementasi Metode Forward Chaining Untuk Diagnosa Penyakit Covid 19 Di Rsud Berkah Pandeglang Banten," *J. Teknol. Inf.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–4, 2020.

[5] R. Rizky, J. S. Informasi, F. Informatika, and U. Mathla, "Pencarian Jalur Terdekat dengan Metode A*(Star) Studi Kasus Serang Labuan Provinsi Banten 1)," no. November, 2018.

[6] R. Rizky, Z. Hakim, A. Sugiarto, A. H. Wibowo, and A. G. Pratama, "Implementasi Metode Simple Additive Weighting Untuk Pemilihan Benih Padi Di Kabupaten Pandeglang," *Explor. J. Sist. Inf. dan Telemat.*, vol. 13, no. 2, p. 110, 2022, doi: 10.36448/jsit.v13i2.2785.

[7] Z. Hakim and R. Rizky, "Sistem Pakar Menentukan Karakteristik Anak Kebutuhan Khusus Siswa Di SLB Pandeglang Banten

Dengan Metode Forward Chaining," vol. 7, no. 1, pp. 93–99, 2019.