



Desain Eksperimen Parameter Boiler ISGEC Kapasitas 80 Ton/Jam untuk Optimasi Produksi Uap

Design of Experiment for ISGEC Boiler with a Capacity Of 80 Tons/Hour for Steam Production Optimization

Deta Nanda Permatasari ¹⁾, Praditya Firmansyah ²⁾

1) Universitas Negeri Malang, Malang

2) Peneliti Pasca Panen Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia, Pasuruan

Alamat korespondensi, Email: deta.nanda.2203126@students.um.ac.id

ABSTRAK

Optimasi sistem ketel uap menjadi aspek penting dalam meningkatkan efisiensi energi di industri gula. Penelitian ini menggunakan desain eksperimen faktorial dua level untuk mengevaluasi pengaruh suhu furnace, suhu air keluar deaerator, suhu udara keluar economizer, dan water flow terhadap steam flow yang dihasilkan oleh ketel ISGEG kapasitas 80 t/j. Percobaan dilakukan dengan 16 kombinasi level parameter yang dianalisis menggunakan metode ANOVA. Parameter untuk pengujian antara lain suhu furnace, suhu air keluar deaerator, suhu udara keluar economizer, dan water flow. Hasil analisis menunjukkan bahwa tidak ada faktor individu yang berpengaruh signifikan terhadap jumlah produksi uap. Berdasarkan uji statistik dengan tingkat signifikansi 5%, nilai F-hitung untuk masing-masing faktor lebih kecil dibandingkan F-tabel, sehingga hipotesis nol diterima. Meskipun demikian, variasi data menunjukkan bahwa efisiensi sistem ketel masih dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak diuji dalam penelitian ini.

Kata kunci: optimasi, ketel uap, desain eksperimen, faktorial dua level, steam flow

ABSTRACT

Optimization of steam boiler systems is an important aspect of improving energy efficiency in the sugar industry. This research uses a two-level factorial experimental design to evaluate the effects of furnace temperature, outlet water temperature from the deaerator, outlet air temperature from the economizer, and water flow on the steam flow produced by the 80 t/h ISGEG boiler. The experiments were conducted with 16 combinations of parameter levels that were analyzed using ANOVA method. The analysis results indicate that no individual factor has a significant effect on the amount of steam production, based on statistical testing with a significance level of 5%. The calculated F-value for each factor is smaller than the F-table, thus the null hypothesis is accepted. Nevertheless, the variation in the data shows that the efficiency of the boiler system is still influenced by other factors not tested in this study.

Key words: optimization, steam boiler, experimental design, two-level factorial, steam flow

PENDAHULUAN

Optimasi efisiensi energi dalam industri gula merupakan aspek penting dalam meningkatkan produktivitas dan mengurangi biaya operasional. Salah satu faktor utama dalam efisiensi energi adalah sistem ketel yang digunakan untuk menghasilkan steam untuk menggerakkan peralatan di pabrik. Menurut Husen (2022) efisiensi pada boiler adalah suatu tingkat kerja yang didapatkan dari proses perpindahan energi fluida yang ada pada boiler dengan ditambahkan bahan bakar yang digunakannya. Efisiensi ketel dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti suhu furnace, suhu keluar daerator, suhu udara keluar economizer, dan pengukuran water flow. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode analisis yang sistematis untuk mengevaluasi pengaruh faktor-faktor tersebut terhadap *steam flow* yang dihasilkan.

Pada musim giling tahun 2019, untuk meningkatkan kapasitas produksi dari 3000 TCD menjadi 4000 TCD serta meningkatkan efisiensi energi, Pabrik Gula X memasang satu unit ketel baru 'ISGEC' dengan kapasitas 80 t/j. Ketel ini beroperasi pada tekanan 47 bar, dan suhu $450 \pm 10^\circ\text{C}$ dengan *enthalpy* uap baru (UBA) sebesar 794,9 kkal/kg. Uap yang digunakan untuk menggerakkan STG 'Toyo Denki' dan sebagian lainnya dialirkan melalui *Pressure Reducing and Desuperheating System* yang menurunkan tekanan menjadi 17,5 bar dan suhu 325°C untuk menggerakkan tiga unit turbin uap di stasiun giling dengan kebutuhan uap sekitar 13,5 t/j (berdasarkan hasil uji musim giling 2014). Sebagian uap juga di alirkan ke *service steam* serta digunakan untuk menggantikan uap dari ketel lama 'UBE'. *Service steam* digunakan untuk berbagai keperluan seperti leburan, kregesengan, dapur belerang, pengeringan dan sanitasi. Oleh karena itu, akurasi pengukuran *steam flow* menjadi sangat penting dalam menentukan efisiensi dan optimasi distribusi uap ke berbagai peralatan yang membutuhkan uap sebagai penggerakannya.

Dalam industri gula, penggunaan uap tidak hanya terbatas pada penggerak turbin generator dan turbin gilingan, tetapi juga untuk berbagai proses lain seperti pengeringan, pemanasan, dan sanitasi. Oleh karena itu, ketepatan dalam mengukur dan mengontrol aliran steam menjadi krusial dalam meningkatkan efisien energi. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mengoptimalkan sistem ini adalah melalui desain eksperimen yang memungkinkan identifikasi faktor-faktor yang memiliki dampak signifikan terhadap kinerja ketel.

Penerapan desain eksperimen dalam industri manufaktur telah terbukti efektif dalam meningkatkan kinerja sistem termal. Desain faktorial memungkinkan identifikasi faktor-faktor utama yang memengaruhi output sistem, termasuk dalam pengujian efisiensi ketel uap. Penelitian sebelumnya telah menyoroti pentingnya perawatan pada mesin bubut CZ6232A menggunakan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) untuk meminimalkan *downtime* dan meningkatkan kinerja operasional (Wibowo et al., 2021)

Studi terbaru oleh Maulana (2021) menekankan pentingnya analisis efisiensi bahan bakar pada ketel uap berkapasitas 13 ton/jam, yang dapat memberikan nilai ekonomis signifikan bagi industri melalui peningkatan efisiensi dan stabilitas penggunaan bahan bakar. Penelitian terbaru juga membahas pengelolaan dan analisis nilai tambah produk samping industri gula di Pabrik Gula Gempolkerp, Mojokerto, yang berkontribusi pada peningkatan efisien energi melalui pemanfaatan produk samping (Novianti et al., 2021).

Selain itu, Penelitian oleh Nari & Rahman (2021) mengkaji pengaruh temperatur air economizer terhadap efisiensi ketel di kapal. Hasil Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperature air economizer berkontribusi positif terhadap efisiensi ketel, yang dapat diadaptasi dalam konteks industri gula

untuk meningkatkan kinerja sistem uap. Evaluasi performa ketel uap juga dilakukan oleh Ritonga et al., (2022) yang menganalisis efisiensi ketel uap kapasitas 7 ton/jam pada PT Chaeron Pokphand Indonesia. Penelitian ini menyoroti pentingnya pemantauan dan perawatan rutin untuk menjaga efisiensi ketel uap, terutama dalam penggunaan bahan bakar cangkang kelapa sawit.

Selain pengukuran nilai bakar CO_2 , CO , dan O_2 data steam flow dari ketel merupakan variabel penting dalam perhitungan efisiensi ketel. Efisiensi ketel (η) didefinisikan sebagai rasio antara energi yang diserap oleh uap (Output Energi Uap) terhadap energi yang dilepaskan oleh bahan bakar (Input Energi Bahan bakar). Seperti menurut Muzaki & Mursadin (2019) dikatakan bahwa rumus efisiensi boiler yaitu:

$$\eta = \left(\frac{\text{Output Energi Uap}}{\text{Input Energi Bahan Bakar}} \right) \times 100\%$$

atau rumus lebih detailnya adalah:

$$\eta = \left(\frac{m_s \times (h_s - h_f)}{m_f \times GCV} \right) \times 100\%$$

dengan:

- η = Efisiensi ketel (%)
- m_s = Laju aliran uap (kg/jam)
- h_s = Entalpi uap jenuh atau superhead steam (kJ/kg)
- h_f = Entalpi air umpan (kJ/kg)
- m_f = Laju aliran bahan bakar (kg/jam)
- GCV = Nilai kalor bahan bakar (Gross Calorific Value) (kJ/kg)

Keakuratan data *steam flow* diperlukan untuk mengetahui berapa jumlah uap yang dihasilkan oleh ketel per kg ampas tebu yang dibakar. Selain itu, efisiensi penggerak utama seperti Turbine Generator (TG) dan turbin penggilingan juga dapat dievaluasi dengan membandingkan energi yang dikonversi dari steam terhadap output daya yang dihasilkan. Dengan pendekatan eksperimen berbasis data, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh

beberapa variabel bebas terhadap steam flow yang dihasilkan oleh ketel ISGEG 80 t/j di Pabrik Gula X.

METODE

Pada penelitian eksperimen ini menggunakan metode *Full Factorial Design* dengan dua level untuk masing-masing variabel bebas. Analisis dilakukan menggunakan ANOVA untuk menentukan signifikansi pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat. Dalam penelitian ini, setiap variabel bebas diberi kode untuk mempermudah analisis dalam model matematis. Notasi dan level variabel yang digunakan dalam desain eksperimen adalah sebagai berikut:

- A = Suhu Furnance (Dapur)
- B = Suhu Keluar Daerator (air pengisi ketel)
- C = Suhu Udara Keluar Economizer
- D = Water flow

Setiap variabel bebas memiliki dua level dalam eksperimen ini, yang dinyatakan sebagai:

- Level rendah (-1) yang artinya nilai variabel pada kondisi minimum
- Level tinggi (+1) yang artinya nilai variabel pada kondisi maksimum

Penggunaan desain faktorial ini bertujuan mengukur baik efek langsung dari masing-masing variabel bebas terhadap steam flow maupun efek interaksi antara dua atau lebih variabel bebas.

Dengan desain faktorial 2-level, hubungan antara steam flow (Y) dan variabel bebas (A, B, C, D) dapat dinyatakan dalam bentuk model regresi sebagai berikut:

$$Y = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_C C + \beta_D D + \beta_{AB} AB + \beta_{AC} AC + \beta_{AD} AD + \beta_{BC} BC + \beta_{BD} BD + \beta_{CD} CD + \beta_{ABC} ABC + \beta_{ABD} ABD + \beta_{ACD} ACD + \beta_{BCD} BCD + \beta_{ABCD} ABCD + \epsilon$$

di mana:

- Y = Steam Flow (output yang diukur)
- β_0 = Intercept (rata-rata steam flow)
- $\beta_A, \beta_B, \beta_C, \beta_D$ = koefisien efek utama masing-masing variabel bebas terhadap steam flow
- $\beta_{AB}, \beta_{AC}, \dots, \beta_{ABCD}$ = Koefisien interaksi antara variabel bebas terhadap steam flow
- ϵ = Error atau noise dalam data eksperimen

Dalam model ini, efek utama ($\beta_A, \beta_B, \beta_C, \beta_D$) menunjukkan pengaruh individual masing-masing variabel terhadap steam flow. Sementara itu, efek interaksi ($\beta_{AB}, \beta_{AC}, \dots, \beta_{ABCD}$) menggambarkan bagaimana kombinasi dua atau lebih variabel bebas dapat saling mempengaruhi dalam menentukan hasil akhir.

Untuk mengetahui apakah suatu variabel bebas atau interaksi antarvariabel memiliki pengaruh signifikan terhadap steam flow, digunakan ANOVA. Menurut Fath dkk (2024) ANOVA digunakan untuk membandingkan rata-rata dari beberapa populasi (lebih dari 2 kelompok populasi) yang diwakili oleh beberapa kelompok sampel secara bersama. Pengujian ini dilakukan dengan menguji hipotesis sebagai berikut untuk setiap koefisien β_i :

$H_0: \beta_i = 0$ (tidak ada pengaruh signifikan)

$H_1: \beta_i \neq 0$ (ada pengaruh signifikan)

Uji ANOVA menghasilkan nilai p-value, yang kemudian dibandingkan dengan tingkat signifikansi ($\alpha = 0.05$):

- Jika $p < 0.05$, maka H_0 ditolak yang artinya variabel bebas atau interaksi

tersebut berpengaruh secara signifikan terhadap *Steam Flow*

- Jika $p \geq 0.05$, maka H_0 gagal ditolak yang artinya variabel tersebut tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap Steam Flow

Dengan demikian, ANOVA digunakan untuk menentukan variabel mana yang benar-benar berkontribusi dalam perubahan *Steam Flow* dan mana yang tidak berpengaruh secara signifikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menganalisis pengaruh variabel percobaan terhadap respon (Y), dilakukan analisis statistik menggunakan Balanced Anova dalam desain eksperimen full faktorial 2-level dengan 4 variabel bebas (A, B, C, D) karena yang digunakan adalah faktorial penuh, jumlah total percobaan adalah $N = 2^k = 2^4 = 16$ dengan $k = 4$ sebagai jumlah faktor yang diuji.

Analisis statistik akan dilakukan untuk menguji signifikansi masing-masing variabel bebas terhadap *steam flow* dengan metode regresi linear dan analisis varians (ANOVA). Uji hipotesis yang akan digunakan adalah:

$$H_0: \beta_i = 0, H_1: \beta_i \neq 0, \text{ untuk } i = 1, 2, 3, 4.$$

Jika H_0 ditolak, maka variabel bebas tersebut memiliki pengaruh signifikan terhadap *steam flow*. Pada table 1 sudah terlihat bahwa setiap kombinasi faktor telah dilakukan sebanyak 16 kali.

SUHU								Tekanan			Gas Hasil Pembakaran			Debit Flow		Bahan Bakar Ampas		
Dapur	Air keluar deaerator (masuk economizer)	Air keluar economizer	Gas keluar ketel (masuk EP)	Gas masuk Air Heater	Uap SH	Uba STG	Suhu ambient	Gas dalam dapur	Gas keluar ketel (masuk EP)	Uap SH	Uba STG	CO2 (Min s.d Max)	O2 (Min s.d Max)	CO (Min s.d Max)	Uap SH (flow indikator)	Air pengisi ketel (flow indikator)	Zat Kering Ampas	
°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	mmH ₂ O	mmH ₂ O	kg/cm ²	kg/cm ²	%	%	%	t/j	t/j	%	
754	101	202	151	255	431	425	30	17	-26	46	44	11	6	0,8	68,50	77,22	53,20	
759	101	198	150	252	428	425	31	12	-28	46	44	10	6	0,8	70,46	74,16	53,20	
779	101	198	152	254	427	424	32	2	-39	45	44	12,5	7,8	1	68,63	74,67	51,40	
741	101	197	152	252	430	427	32	-10	-36	46	44	13,5	10	1,2	64,11	75,77	51,40	
750	101	198	151	251	431	421	32	4	-35	45	43	13,5	10	1,2	64,47	75,35	50,10	
730	101	195	149	248	435	425	31	-8	-23	43	43	13	8	1	67,30	70,34	50,10	
744	101	200	151	255	434	427	33	14	-21	46	47	13	8	1	64,99	72,28	50,20	
759	101	195	149	249	412	416	30	-13	-107	45	44	10	6	0,8	63,79	78,62	50,20	
767	102	200	150	251	429	420	31	17	-33	45	45	13	8	1	62,33	79,14	50,00	
774	101	200	150	249	412	419	32	4	-33	46	45	13	8	1	64,34	70,16	50,00	
746	101	200	150	248	434	417	32	11	-48	46	43	10	6	0,8	71,04	80,65	49,91	
745	104	195	150	251	431	419	32	19	-37	46	45	12,5	7,8	1	68,05	73,33	49,91	
675	101	205	147	244	434	410	31	-12	-31	46	45	13,5	10	1,2	63,84	75,68	49,76	
767	102	200	143	249	429	425	33	2	-26	46	47	13	8	1	64,58	63,75	49,76	
730	102	196	149	246	445	441	30	9	-51	45	45	11	6	0,8	63,81	64,36	47,60	
738	102	196	148	246	450	441	31	-10	-91	46	45	10	6	0,8	60,97	61,28	47,60	
758	102	198	150	248	453	437	32	-10	-69	48	47	12,5	7,8	1	59,90	70,82	49,20	
705	102	198	148	245	447	442	32	12	-66	47	46	12,5	7,8	1	58,16	67,65	49,20	
716	101	198	149	247	429	444	32	9	-59	45	44	13,5	10	1,2	63,86	71,14	50,10	
741	100	192	148	245	457	438	31	5	-94	45	44	13	8	1	59,07	67,27	50,10	
750	100	192	149	246	424	440	33	13	-96	47	46	13	8	1	65,19	65,43	52,10	
Max	779	104	205	152	255	457	444	33	19	-21	48	47	13,5	10	1,2	71,04	80,65	53,2
Min	675	100	192	143	244	412	410	30	-13	-107	43	43	10	6	0,8	58,16	61,28	47,6

Gambar 1. Data hasil pengukuran dari commissioning PG X di Jawa Tengah, 2019
 Figure 1. Measurement data from PG X commissioning in Central Java, 2019

Tabel 1. Data pengujian 2 level faktorial, 16 running
 Table 1. Test data of 2 factorial levels, 16 running

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Suhu Furnance	Suhu Air Keluar Daerator	Suhu Udara Keluar Economizer	Water Flow	Steam Flow (response)
1	1	1	1	675	100	192	61,28	68,50
2	2	1	1	779	100	192	61,28	70,46
3	3	1	1	675	104	192	61,28	68,63
4	4	1	1	779	104	192	61,28	64,11
5	5	1	1	675	100	205	61,28	64,47
6	6	1	1	779	100	205	61,28	67,30
7	7	1	1	675	104	205	61,28	64,99
8	8	1	1	779	104	205	61,28	63,79
9	9	1	1	675	100	192	80,65	62,33
10	10	1	1	779	100	192	80,65	64,34
11	11	1	1	675	104	192	80,65	71,04
12	12	1	1	779	104	192	80,65	68,05
13	13	1	1	675	100	205	80,65	65,84
14	14	1	1	779	100	205	80,65	64,58
15	15	1	1	675	104	205	80,65	63,81
16	16	1	1	779	104	205	80,65	60,97

Analisis dengan perhitungan statistika

Untuk menganalisis eksperimental terhadap steam flow dilakukan menggunakan ANOVA dengan perbandingan Fisher Pairwise untuk menguji signifikansi faktor-faktor dalam eksperimen. Tingkat signifikansi yang

digunakan adalah $\alpha = 0,05$ atau 95% confidence level. Hipotesis uji yang dirumuskan adalah:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \text{ (Semua rata-rata kelompok adalah sama)}$$

$$H_a = \text{Setidaknya ada satu rata-rata kelompok yang berbeda}$$

Dari gambar 2 tersebut kita akan lakukan perhitungan ANOVA, kita akan menghitung ke empat faktor tersebut dengan mencari Sum of Squares untuk setiap faktor (SS_Faktor), Sum of Squares

untuk Error (SSE), Mean Square (MS), Uji F untuk setiap faktor. Menurut Valchanov (2024) beberapa rumus untuk ANOVA akan dijabarkan sebagai berikut:

1. Menghitung rata-rata keseluruhan (\bar{Y})

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{N} = \frac{68,50 + 70,46 + 68,63 + 64,11 + 64,47 + 67,30 + 64,99 + 63,79 + 62,33 + 64,34 + 71,04 + 68,05 + 65,84 + 64,58 + 63,81 + 60,97}{16} = \frac{1053,21}{16} = 65,82563$$

2. Menghitung total sum of squares (SST)

$$SST = \sum (Y_i - \bar{Y})^2$$

Untuk setiap nilai Y_i :

$$\begin{aligned} (68,50 - 65,82563)^2 &= (2,77437)^2 = 7,697129 \\ (70,46 - 65,82563)^2 &= (4,63437)^2 = 21,47739 \\ (68,63 - 65,82563)^2 &= (2,804375)^2 = 7,864519 \\ (64,11 - 65,82563)^2 &= (-1,71563)^2 = 2,943369 \\ (64,47 - 65,82563)^2 &= (-1,35563)^2 = 1,837719 \\ (67,30 - 65,82563)^2 &= (1,474375)^2 = 2,173782 \\ (64,99 - 65,82563)^2 &= (-0,83563)^2 = 0,698269 \\ (63,79 - 65,82563)^2 &= (-2,03563)^2 = 4,143769 \\ (62,33 - 65,82563)^2 &= (-3,49563)^2 = 12,21939 \\ (64,34 - 65,82563)^2 &= (-1,48563)^2 = 2,207082 \\ (71,04 - 65,82563)^2 &= (5,214375)^2 = 27,18971 \\ (68,05 - 65,82563)^2 &= (2,224375)^2 = 4,947844 \\ (65,84 - 65,82563)^2 &= (0,014375)^2 = 0,000207 \\ (64,58 - 65,82563)^2 &= (-1,24563)^2 = 1,551582 \\ (63,81 - 65,82563)^2 &= (-2,01563)^2 = 4,062744 \\ (60,97 - 65,82563)^2 &= (-4,85563)^2 = 23,57709 \end{aligned}$$

$$SST = 124,5916$$

3. Menghitung sum of squares untuk masing-masing faktor

- a. Suhu Furnance (SS_Furnance)

Kita memiliki dua level yaitu Suhu Furnance 675 dengan 8 data dan, Suhu Furnance 779 dengan 8 data. Disini akan dihitung rata-rata masing grup:

$$\bar{Y}_{675} = \frac{68,50 + 68,63 + 64,47 + 64,99 + 62,33 + 71,04 + 65,84 + 63,81}{8} = \frac{529,61}{8} = 66,20125$$

$$\bar{Y}_{779} = \frac{70,46 + 64,11 + 67,30 + 63,79 + 64,34 + 68,05 + 64,58 + 60,97}{8} = \frac{523,6}{8} = 65,45$$

$$SS_{Furnance} = 8 \times (66,20125 - 65,82563)^2 + 8 \times (65,45 - 65,82563)^2$$

$$\begin{aligned}
 &= 8 \times (0,37562)^2 + 8 \times (-0,37563)^2 \\
 &= 8 \times 0,14109 + 8 \times 0,141098 \\
 &= 1,12872 + 1,128784 \\
 &= 2,257504
 \end{aligned}$$

b. Suhu air keluar Daerator (SS_Daerator)

Kita memiliki dua level yaitu Suhu Daerator 100 dengan 8 data dan, Suhu Daerator 104 dengan 8 data. Disini akan dihitung rata-rata masing grup:

$$\begin{aligned}
 \bar{Y}_{100} &= \frac{68,50 + 70,46 + 64,47 + 67,30 + 62,33 + 64,34 + 65,84 + 64,58}{8} \\
 &= \frac{527,82}{8} = 65,9775
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{Y}_{104} &= \frac{68,63 + 64,11 + 64,99 + 63,79 + 71,04 + 68,05 + 63,81 + 60,97}{8} \\
 &= \frac{525,39}{8} = 65,67375
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 SS_{Daerator} &= 8 \times (65,9775 - 65,82563)^2 + 8 \times (65,67375 - 65,82563)^2 \\
 &= 8 \times (0,15187)^2 + 8 \times (-0,15188)^2 \\
 &= 8 \times 0,023064 + 8 \times 0,023068 \\
 &= 0,184516 + 0,18454 \\
 &= 0,369056
 \end{aligned}$$

c. Suhu udara keluar Economizer (SS_Economizer)

Kita memiliki dua level yaitu Suhu Economizer 192 dengan 8 data dan, Suhu Economizer 205 dengan 8 data. Disini akan dihitung rata-rata masing grup:

$$\begin{aligned}
 \bar{Y}_{192} &= \frac{68,50 + 70,46 + 68,63 + 64,11 + 62,33 + 64,34 + 71,05 + 68,05}{8} \\
 &= \frac{537,47}{8} = 67,18375
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{Y}_{205} &= \frac{64,47 + 67,30 + 64,99 + 63,79 + 65,84 + 64,58 + 63,81 + 60,97}{8} \\
 &= \frac{515,75}{8} = 64,46875
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 SS_{Economizer} &= 8 \times (67,18375 - 65,82563)^2 + 8 \times (64,46875 - 65,82563)^2 \\
 &= 8 \times (1,35812)^2 + 8 \times (-1,35688)^2 \\
 &= 8 \times 0,184516 + 8 \times 1,841123 \\
 &= 14,75592 + 14,72899 \\
 &= 29,48491
 \end{aligned}$$

d. Water Flow (SS_WaterFlow)

Kita memiliki dua level yaitu Water Flow 61,28 dengan 8 data dan, Water Flow 80,65 dengan 8 data. Disini akan dihitung rata-rata masing grup:

$$\begin{aligned}
 \bar{Y}_{61,28} &= \frac{68,50 + 70,46 + 68,63 + 64,11 + 64,47 + 67,30 + 64,99 + 63,79}{8} \\
 &= \frac{532,25}{8} = 66,53125
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{Y}_{80,65} &= \frac{62,33 + 64,34 + 71,04 + 68,05 + 65,84 + 64,58 + 63,81 + 60,97}{8} \\
 &= \frac{520,96}{8} = 65,12
 \end{aligned}$$

$$SS_{WaterFlow} = 8 \times (66,53125 - 65,82563)^2 + 8 \times (65,12 - 65,82563)^2$$

$$\begin{aligned}
 &= 8 \times (0,70562)^2 + 8 \times (-0,70563)^2 \\
 &= 8 \times 0,4979 + 8 \times 0,497914 \\
 &= 3,983197 + 3,98331 \\
 &= 7,966507
 \end{aligned}$$

4. Menghitung SSE

$$\begin{aligned}
 SSE &= SST - (SS_{Furnance} + SS_{Daerator} + SS_{Economizer} + SS_{WaterFlow}) \\
 &= 124,5916 - (2,257504 + 0,369056 + 29,48491 + 7,966507) \\
 &= 124,5916 - 40,07798 \\
 &= 84,51362
 \end{aligned}$$

5. Mengitung mean squares (MS)

$$\begin{aligned}
 MS_{Furnance} &= \frac{SS_{Furnance}}{df_{Furnance}} = \frac{2,257504}{1} = 2,257504 \\
 MS_{Daerator} &= \frac{SS_{Daerator}}{df_{Daerator}} = \frac{0,369056}{1} = 0,369056 \\
 MS_{Economizer} &= \frac{SS_{Economizer}}{df_{Economizer}} = \frac{29,48491}{1} = 29,48491 \\
 MS_{WaterFlow} &= \frac{SS_{WaterFlow}}{df_{WaterFlow}} = \frac{7,966507}{1} = 7,966507 \\
 MS_{Error} &= \frac{SS_{Error}}{df_{Error}} = \frac{84,51362}{12} = 7,042802
 \end{aligned}$$

6. Menghitung uji F

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{MS_{factor}}{MS_{error}} \\
 F_{Furnance} &= \frac{2,257504}{7,042802} = 0,320541 \\
 F_{Daerator} &= \frac{0,369056}{7,042802} = 0,052402 \\
 F_{Economizer} &= \frac{29,48491}{7,042802} = 4,186531 \\
 F_{WaterFlow} &= \frac{7,966507}{7,042802} = 1,131156
 \end{aligned}$$

7. Mencari p-value

a. Suhu Furnance

$$\begin{aligned}
 F &= 0,320541 \\
 df_1 &= 1, df_2 = 12 \\
 F_{CDF}(0,320541,1,12) &\approx 0,418284 \\
 p &= 1 - 0,320541 = 0,581716
 \end{aligned}$$

b. Suhu air keluar Daerator

$$\begin{aligned}
 F &= 0,052402 \\
 df_1 &= 1, df_2 = 12 \\
 F_{CDF}(0,052402,1,12) &\approx 0,17721 \\
 p &= 1 - 0,17721 = 0,82279
 \end{aligned}$$

c. Suhu udara keluar Economizer

$$F = 4,186531$$

$$df_1 = 1, df_2 = 12$$

$$F_{CDF}(4,186531,1,12) \approx 0,936694$$

$$p = 1 - 0,936694 = 0,063306$$

d. Water Flow

$$F = 1,131156$$

$$df_1 = 1, df_2 = 12$$

$$F_{CDF}(1,131156,1,12) \approx 0,691537$$

$$p = 1 - 0,691537 = 0,308463$$

Setelah dihitung diperoleh tabel ringkasan berikut:

Tabel 2. Hasil Perhitungan ANOVA

Table 2. Anova Calculation Results

Sumber Variasi	DF	SS	MS	F	P
Suhu Furnance	1	2,257504	2,257504	0,320541	0,581716
Suhu air keluar Daerator	1	0,369056	0,369056	0,052402	0,82279
Suhu udara keluar Economizer	1	29,48491	29,48491	4,186531	0,063306
Water Flow	1	7,966507	7,966507	1,131156	0,308463
Error	12	84,51362	7,042802		
Total	14	124,5916			

Dari tabel ringkasan di dapatkan untuk setiap faktornya:

- Suhu Furnance: $F = 0,320541$, dengan $P = 0,581716 > 0,05$, maka H_0 diterima
- Suhu Air Keluar Dearator: $F = 0,052402$, dengan $P = 0,82279 > 0,05$, maka H_0 diterima
- Suhu Udara Keluar Economizer: $F = 4,186531$, dengan $P = 0,063306 > 0,05$, maka H_0 diterima
- Suhu Water Flow: $F = 1,131156$, dengan $P = 0,308463 > 0,05$, maka H_0 diterima

Karena semua faktor nilai P-valuenya lebih besar dari 0,05, maka tidak ada faktor yang berpengaruh signifikan terhadap Steam Flow

Untuk mengukur seberapa besar variabilitas Steam Flow yang dapat dijelaskan oleh faktor-faktor dalam eksperimen, digunakan koefisien

determinasi R^2 , menurut Alfarhan (2024) rumus koefisien determinasi adalah:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{Error}}{SS_{total}}$$

dengan:

$$R^2 = 1 - \frac{84,51362}{124,5916} = 1 - 0,678325$$

$$= 0,321675 = 32,17\%$$

Dari hasil perhitungan nilai R^2 tersebut menunjukkan bahwa 32,17% variabilitas dalam Steam Flow dapat dijelaskan oleh faktor-faktor eksperimen, sedangkan 67,83% dipengaruhi oleh faktor lain atau noise.

Analisis menggunakan minitab

Untuk memastikan hasil analisis statistik yang lebih akurat dan efisien, dilakukan perhitungan ANOVA menggunakan perangkat lunak Minitab. Untuk melakukan analisis menggunakan ANOVA perlu memasukkan data-data yang sudah didapatkan lalu menuju menu Stat >

ANOVA > Balenced ANOVA > melakukan pemilihan Responses (Steam Flow) dan Model (Suhu furnance, suhu air keluar Daerator, Suhu udara keluar Economizer, dan water flow) > OK, dan akan didapatkan output

Analysis of Variance for Steam Flow (Response)

Source	DF	SS	MS	F	P
Suhu Furnance	1	2,258	2,2575	0,30	0,597
Suhu air keluar Dearator	1	0,369	0,3691	0,05	0,830
Suhu udara keluar Economizer	1	29,458	29,4578	3,86	0,075
water flow	1	7,967	7,9665	1,04	0,329
Error	11	83,996	7,6360		
Total	15	124,047			

Gambar 2. Hasil analisis varians untuk aliran uap

Figure 2. Variance analysis results for Steam flow

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
2,76333	32,29%	7,66%

Gambar 3. Ringkasan hasil model

Figure 3. Summary model results

Dari hasil perhitungan Minitab, diperoleh p-value untuk semua faktor lebih besari dari 0,05 yang menunjukkan bahwa tidak ada faktor yang berpengaruh signifikan terhadap steam flow. Namun, Suhu Udara Keluar Economizer memiliki p-value 0,075 yang mendekati batas signifikansi 5% sehingga dapat menjadi perhatian untuk analisis lebih lanjut. Selain itu, nilai R-squared sebesar 32,29% menunjukkan bahwa model kurang mampu menjelaskan variabilitas data. Sedangkan Adjustment R-Squared yang hanya 7,66% semakin memperkuat bahwa faktor-faktor yang diuji kurang berkontribusi dalam menjelaskan perubahan Steam Flow. Dengan demikian, hasil dari Minitab memperkuat temuan dari perhitungan manual.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis diperoleh untuk nilai p-value menunjukkan bahwa tidak ada faktor yang memiliki pengaruh signifikan terhadap steam flow, karena semua p-value lebih besar dari 0,05. Ini berarti tidak terdapat cukup bukti untuk menolak hipotesis nol. Untuk nilai F_{hitung} karena lebih kecil dari F_{tabel} ini menunjukkan bahwa variasi antar kelompok tidak cukup signifikan dibandingkan variasi dalam kelompok, sehingga ke empat faktor tersebut tidak dianggap berpengaruh secara statistik terhadap steam flow. Berdasarkan hasil ANOVA ditarik kesimpulan bahwa tidak ditemukan faktor yang secara signifikan mempengaruhi steam flow. Ini menunjukkan bahwa faktor-faktor yang diuji mungkin tidak berperan secara dominan dalam variasi data dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 32,29%, yang menunjukkan bahwa masih terdapat faktor lain yang lebih dominan mempengaruhi Steam Flow.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfarhan, S. (2024) Koefisien Determinasi (R-Square). [Online] Tersedia dari: Statistiser, all about statistics: Koefisien Determinasi (R-Square) [Diakses tanggal 25 Februari 2025]
- Fath, N., Sirait R. & Purwalaksana, E. (2024) *Probabilitas Statistika*, Deepublish Digital.
- Husen, A. (2022) Analisis Efisiensi Energi Pada Boiler Industri Tipe Fire-Tube Kapasitas 2Ton/Jam Dengan Bahan Bakar Compressed Natural Gas (CNG) Di PT. X, *Sanstech*. 32(2), 67-75. Tersedia dari: <https://ejournal.istn.ac.id/index.php/sainstech/article/download/1302/862> [Diakses tanggal 20 Februari 2025]
- Maulana, I. (2021) Analisis Efisiensi Bahan Bakar Ketel Uap Berkapasitas 13 Ton/Jam di Pabrik Kelapa Sawit PT.

- XYZ. [Online] Tersedia dari: ABSTRAK.docx [Diakses tanggal 26 Februari 2025]
- Muzaki, I. & Mursadin, A. (2019) Analisis Efisiensi Boiler dengan Metode Input-Output di PT. Japfa Comfeed Indonesia Tbk. Unit Banjarmasin, *Sjme Kinematika*, 4(1), 37-46. Tersedia dari: <https://kinematika.ulm.ac.id/index.php/kinematika/article/view/50> [Diakses tanggal 20 Februari 2025]
- Nari, H,P. & Rahman, M,S (2022) Analisis Pengaruh Temperatur Air Economizer Terhadap Efisiensi Ketel di KM Meratus Kupang. [Online] Tersedia dari: Analisis Pengaruh Temperatur Air Economizer Terhadap Efisiensi Ketel Di Km Meratus Kupang | Jurnal Venus [Diakses tanggal 26 Februari 2025]
- Novianti, R., Syaikat, Y. & Ekayani, M (2021) Pengelolaan dan Analisis Nilai Tambah By Products Industri Gula (Studi Kasus di Pabrik Gula Gempolkerp, Mojokerto, Jawa Timur), *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 26(3), 400-405. Tersedia dari: View of Pengelolaan dan Analisis Nilai Tambah By-Products Industri Gula (Studi Kasus di Pabrik Gula Gempolkerp, Mojokerto, Jawa Timur) [Diakses tanggal 27 Februari 2025]
- Ritonga, H, H., Nasution, M. & Napid, S. (2022) Analisa Efisiensi Ketel Uap Kapasitas 7 ton/jam pada PT Chaeron Pokphand Indonesia KIM II Mabar, *Piston*, 7(1). Tersedia dari: Analisa Efisiensi Ketel Uap Kapasitas 7 Ton/Jam Pada Pt Charoen Pokphand Indonesia Kim Ii Mabar | Ritonga | Piston (Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Fakultas Teknik Uisu) [Diakses tanggal 26 Februari 2025]
- Valchanov, I. (2024) Sum of Squares: SST, SSR, SSE. [Online] Tersedia dari: Sum of Squares: SST, SSR, SSE – 365 Data Science [Diakses tanggal 25 Februari 2025]
- Wibowo, T, J., Hidayatullah T, S. & Nalhadi, A. (2021) Analisa Perawatan pada Mesin Bubut dengan pendekatan Reliability Centered Maintenance (RCM), *Jurnal Rekayasa Industri*, 3(2). Tersedia dari: Analisa Perawatan pada Mesin Bubut dengan Pendekatan Reliability Centered Maintenance (RCM) | Jurnal Rekayasa Industri (JRI) [Diakses tanggal 27 Februari 2025]