



Pengaruh Nilai Bukaannya Valve Terhadap Daya Yang Dihasilkan Oleh Turbin Uap Dalam Waste to Heat Energy System

Mpu Alit^{1*}, Haolia Rahman², dan M Silvano Ibrahim³

¹Program Studi D-3 Teknik Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

²Program Magister Terapan Teknologi Manufaktur, Paska Sarjana, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

³PT Badak NGL, Bontang, Kalimantan Timur 75324

Abstrak

Turbin uap merupakan mesin penggerak, dimana gaya fluida (berupa uap) langsung digunakan untuk memutar sudu-sudu turbin. Penyesuaian nilai bukaannya valve umpan turbin uap bertekanan merupakan suatu pekerjaan yang dilakukan untuk mengoptimalkan proses dengan meningkatkan daya keluaran turbin. Dari hukum termodinamika didapatkan bahwasanya nilai daya akan meningkat seiring bertambahnya laju alir umpan dan meningkatnya nilai enthalpy umpan. Nilai enthalpy bergantung kepada nilai tekanan dan temperatur dari fluida terkait. Namun yang menjadi pertimbangan adalah nilai tekanan dan laju alir umpan berbanding terbalik, sehingga diperlukan konfigurasi bukaannya valve yang tepat sebagai hasil optimasi proses. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan nilai bukaannya valve optimal 2850 (step), tekanan inlet (10 barg), dan laju alir sebesar 0,886 (g/s) yang menghasilkan daya sebesar 421,011 (J/s).

Kata-kata kunci: Turbin Uap, Bukaannya Valve, Laju Alir, Enthalpy, Daya

Abstract

The steam turbine is a driving machine, where the fluid force (in the form of steam) is directly used to rotate the turbine blades. Adjusting the value of the pressure steam turbine feed valve opening is a job done to optimize the process by increasing the turbine output power. From the law of thermodynamics, it is found that the power value will increase as the feed flow rate increases and the feed enthalpy value increases. The enthalpy value depends on the pressure and temperature values of the fluid involved. However, what is taken into consideration is that the pressure value and feed flow rate are inversely proportional, so proper configuration of valve openings is needed as a result of process optimization. Based on the research that has been done, the optimal valve opening value is 2850 (step), inlet pressure (10 barg), and flow rate is 0.886 (g/s) which produces 421.011 (J/s) power.

Keywords: Steam turbine, Valve Opening, Flow Rate, Enthalpy, Power

* Corresponding author E-mail address: mpualit@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Dewasa ini, perkembangan konsep *Waste to Energy* terus mengalami peningkatan. Inti dari proses tersebut adalah memanfaatkan energi dalam bentuk panas yang dibangkitkan dari bahan bakar sampah atau produk sekunder dengan proses konversi thermal. Pada dasarnya, proses konversi thermal dapat dicapai melalui beberapa cara, yaitu insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi. Insinerasi pada dasarnya ialah proses oksidasi bahan-bahan organik menjadi bahan anorganik. Prosesnya sendiri merupakan reaksi oksidasi cepat antara bahan organik dengan oksigen.

Panas yang dibangkitkan lalu digunakan untuk memanaskan air menjadi uap bertekanan. Uap dari boiler akan dialirkan menuju ke turbin. Uap dengan kondisi tekanan yang tinggi dialirkan sepanjang poros dengan melewati beberapa tingkat sudu. Kemudian uap akan bertemu dengan sudu gerak. Pada saat bertumbukan secara langsung dengan uap, sudu gerak ini menerima sebagian energi kinetik yang dimiliki uap. Pada pembangkit listrik, turbin uap langsung tersambung dengan generator elektrik dalam satu poros. Generator elektrik mengkonversi energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik yang tersambung dengan grid. Pada Realisasi Pembangkit Listrik Mini Tenaga Sampah oleh aqsha dkk, didapatkan hasil daya rata-rata generator sebesar 79 mW (Aqsha et al, 2015). Penelitian serupa jug dilakukan oleh Tansa dkk, dengan hasil daya rata-rata yang generator sebesar 8,92 W (Tansa et al, 2019).

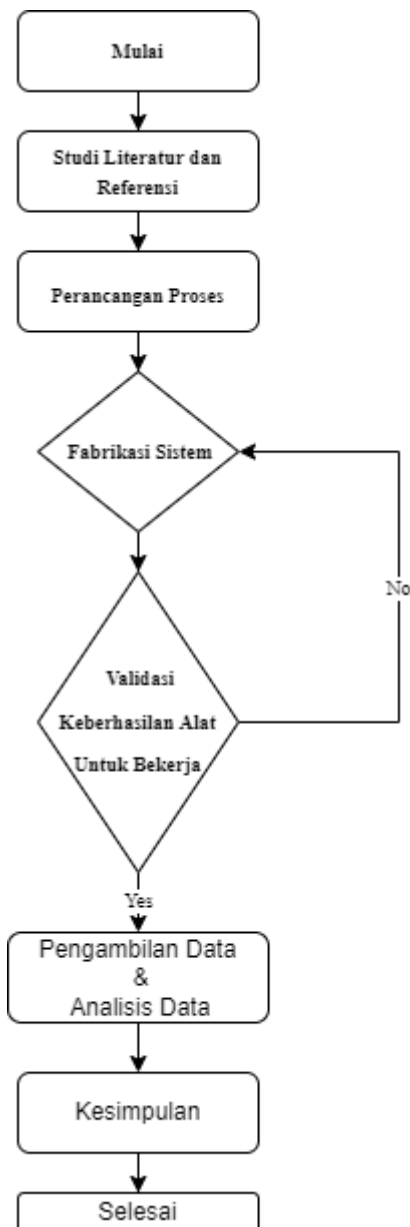
Turbin uap sebagai mesin penggerak bertenaga uap mengubah energi potensial menjadi energi kinetik yang selanjutnya diubah menjadi sebuah energi mekanik yang terbentuk dalam putaran poros turbin. Nilai daya yang dihasilkan bergantung kepada laju alir fluida yang masuk dan perbedaan nilai enthalpy inlet dan outlet. Nilai *enthalpy* didapatkan dari nilai tekanan dan temperatur fluida penggerak sebelum dan sesudah melewati turbin. Yang kemudian, nilai laju alir fluida dan nilai tekanan bergantung pada nilai bukaan valve sebagai tempat fluida penggerak mengalir.

Perlu adanya kajian mengenai pengaturan konfigurasi bukaan valve yang optimal untuk mendapatkan nilai akhir berupa daya yang optimal pula. Penyesuaian nilai bukaan valve umpan turbin uap bertekanan merupakan suatu pekerjaan yang dilakukan untuk mengoptimalkan proses dengan meningkatkan nilai daya keluaran turbin. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem.

Tujuan dari studi ini adalah mendapatkan nilai daya keluaran turbin optimal dengan melakukan penyesuaian konfigurasi bukaan valve. Kemudian menginvestigasi hubungan antara bukaan valve terhadap tekanan sistem, bukaan valve terhadap laju alir *steam*, dan bukaan valve terhadap daya yang dihasilkan turbin.

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, terdapat metode penelitian yang telah disusun ke dalam bentuk diagram alir seperti ditunjukkan oleh gambar 2.1. Metode penelitian ini kemudian dapat digunakan sebagai acuan dalam melaksanakan setiap prosesnya dan dapat memudahkan di dalam menilai sejauh mana penelitian ini telah dilaksanakan.

Diagram Alir Penelitian

Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Penjelasan Langkah Kerja

Penjelasan terkait rencana kerja yang akan dilakukan adalah sebagai berikut,

1. Studi Literatur dan Referensi

Studi literatur dan referensi dilakukan dengan cara mengumpulkan informasi serta data-data yang didapatkan dari hasil penelitian maupun percobaan yang berkaitan dengan penelitian ini. Referensi jurnal tersebut dapat dijadikan sebagai acuan dalam pembuatan sistem ini. Informasi tersebut diperoleh dari buku-buku ilmiah, laporan penelitian, jurnal, karangan-karangan ilmiah, ensiklopedia, dan sumber-sumber tertulis baik tercetak maupun elektronik.

2. Perancangan Proses

Perancangan proses merupakan penyusunan jenis proses yang akan digunakan berdasarkan hasil studi literatur hingga pembuatan diagram alir proses (process flow diagram) yang nantinya akan digunakan pada sistem/ unit ini.

3. Fabrikasi Sistem

Fabrikasi dan Perakitan Unit Waste to Energy System dilakukan di Workshop LNG Academy dan Bengkel Induk PT. Badak NGL. Fabrikasi merupakan realisasi dari desain proses dan alat yang telah dilakukan sebelumnya. Perakitan komponen instrumentasi dilakukan setelah fabrikasi alat secara mekanik telah selesai.

4. Validasi Keberhasilan Alat Untuk Bekerja

Proses validasi keberhasilan alat merupakan langkah uji coba alat untuk menghasilkan output dan mengecek kesiapan alat untuk pengambilan data.

5. Pengambilan Data dan Analisis Data

Pengambilan data dilakukan berupa data kuantitatif meliputi tekanan & temperatur uap bertekanan sebelum dan sesudah melewati turbin serta nilai laju alir sebelum memasuki turbin uap. Yang kemudian data-data tersebut akan diolah untuk mendapatkan nilai enthalpy dan daya yang dihasilkan oleh turbin. Langkah selanjutnya adalah mencari hubungan antara nilai bukaan valve dengan daya yang dihasilkan, laju alir steam, dan nilai tekanan steam.

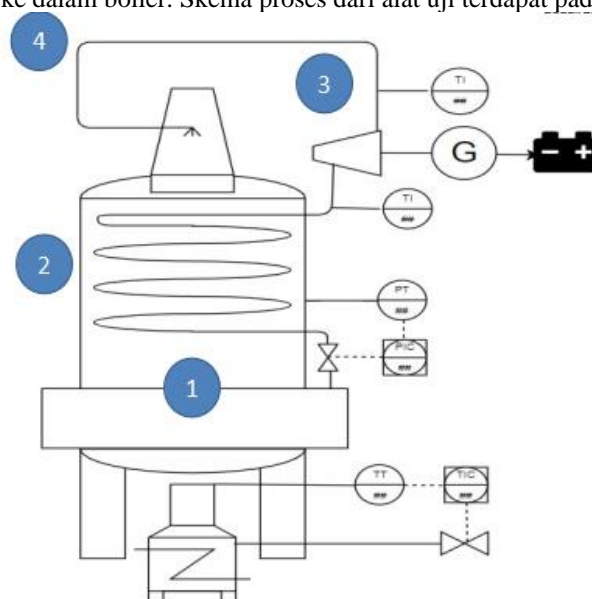
Pengambilan data dilakukan di alat “Waste Burner Hybrid Steam Generator”, dengan melakukan pembacaan pada instrumen-instrumen yang menunjukkan pembacaan pada masing-masing nilai. Adapun parameter yang diambil adalah tekanan sistem (sebelum dan sesudah turbin) dengan alat bantu *pressure indicator*, temperatur sistem (sebelum dan sesudah turbin) dengan alat bantu *temperature indicator*, dan nilai laju alir menggunakan *flowmeter*.

6. Kesimpulan

Penarikan kesimpulan berasal dari hasil yang sudah didapatkan dari pengolahan data.

3. DESKRIPSI PROSES

Sistem siklus yang dipakai dalam penelitian ini adalah siklus terbuka, dimana steam keluaran turbin tidak akan dimasukkan kembali ke dalam boiler. Skema proses dari alat uji terdapat pada gambar 2.



Gambar 2 Skema Proses

1) Boiler atau Steam Generator

Steam generator merupakan suatu sistem yang bertujuan untuk membangkitkan uap sesuai dengan kriteria siklus turbin uap yang sudah ditentukan. Steam generator ini akan menyediakan uap bertekanan dan temperatur sesuai dengan desain, laju aliran masa yang tepat, tingkat puritas yang tinggi, serta memiliki kualitas yang tinggi atau berupa uap kering yang sudah tidak mengandung air.

2) Ruang Bakar Insinerator (Furnace) dan Superheater

Ruang Bakar Incenerator (Furnace) berfungsi untuk ruang pembakar sampah. Ruang bakar ini didesain sedemikian rupa agar dapat digunakan sebagai proses konversi panas gas pembakaran ke pipa air sehingga membangkitkan uap yang nantinya akan membangkitkan listrik melalui konversi ke turbin dan generator. Temperatur pada ruang bakar incenerator mencapai 1200 °C. Furnace ini akan menyalurkan panas pembakaran dari hasil pembakaran ke steam generator sehingga air dapat menjadi uap air bertekanan sekaligus menyuplai panas untuk superheater.

Panas yang terjadi karena proses pembakaran dikonversikan ke peralatan / pipa penukar panas sehingga uap akan terbangkitkan dan temperatur gas bakar akan turun. Sebelum gas dibuang keluar, maka ada unit penukar panas yang akan menyerap panas dari gas tersebut yaitu pemanas awal air pengisian boiler. Dari temperature gas buang 800 – 900°C dapat diturunkan sampai 200 °C yang akan dilepas ke udara melalui cerobong.

3) Turbin Uap dan Generator

Pada penelitian ini digunakan turbocharger sebagai turbin uap. Untuk mengkonversikan energi uap menjadi energi listrik, maka peralatan pengkonversi seperti turbin uap dan generator di instalasi pada sisi pemanfaatan uap yang terbangkitkan. Uap akan memutar turbin yang dikopel dengan generator listrik. Sehingga daya listrik dapat diproduksi dari proses konversi energi. Daya yang dapat dibangkitkan tergantung pada jumlah sampah yang memiliki kandungan bahan mampu bakar seperti serat, kertas atau limbah biomassa.

Generator merupakan peralatan yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Pada pembangkit listrik tenaga uap, generator berfungsi untuk mengubah putaran dari turbin uap menjadi menjadi energi listrik. Bila kecepatan putaran rotor meningkat maka daya yang dihasilkan generator akan meningkat pula, oleh karena itu putaran generator harus disesuaikan dengan output daya yang dibutuhkan.

4) Steam Sprayer

Uap keluaran steam turbin dialirkan menjadi steam sprayer sebagai wet scrubber emisi pembakaran.

Parameter Desain

Alat ini bekerja pada tekanan desain steam generator sebesar 15 barg. Sampah dimasukkan secara kontinyu selama pembakaran berlangsung dengan laju alir 0,25 kg/menit. Sedangkan volume air di dalam steam generator mengikuti sistem batch dengan volume 4L. Laju alir biodiesel dijaga pada nilai 1L/jam. Dimana alat ini beroperasi selama 1 jam dalam satu kali siklusnya.

Parameter Pengambilan Data:

1. Nilai Tekanan

Pengumpulan data nilai tekanan didapatkan dari nilai bacaan *pressure indicator* yang terpasang sebelum dan sesudah turbin uap.

2. Nilai Temperatur

Pengumpulan data nilai temperatur didapatkan dari nilai bacaan *temperature indicator* yang terpasang sebelum dan sesudah turbin uap.

3. Nilai Laju Alir Massa

Nilai Laju Alir Massa didapatkan dari bacaan flowmeter yang terpasang sebelum turbin uap.

4. Nilai Buka Valve

Nilai buka valve diatur oleh PID (Proportional, Integral, & Derivative) yang merupakan variabel bebas di dalam penelitian ini.

Data Yang Melalui Proses Kalkulasi :

1. Nilai Enthalpy

Nilai entalpi penguapan atau panas laten penguapan yaitu energi yang diperlukan untuk menguapkan satu satuan massa cair jenuh pada temperatur atau tekanan yang diberikan (Moran & Shapiro, 2005).

Nilai enthalpy didapatkan dari interpolasi steam table.

$$Y = y_1 + \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} \times (y_2 - y_1)$$

Dimana :

- y_1 = Entalpi awal dari range nilai yang tersedia di steam table (kJ/kg)
- y_2 = Entalpi akhir dari range nilai yang tersedia di steam table (kJ/kg)
- x_1 = Tekanan awal dari nilai yang tersedia di steam table (bar)
- x_2 = Tekanan akhir dari nilai yang tersedia di steam table (bar)
- x = Tekanan yang akan dicari nilai entalpinya (bar)
- y = Nilai entalpi yang dicari (kJ/kg)

2. Nilai Daya

Daya keluaran turbin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$W_{turbin} = \dot{m} \times (h_1 - h_2)$$

Dimana :

- W_{turbin} = Daya keluaran turbin (kW)
- \dot{m} = laju aliran fluida (ua) yang masuk ke dalam turbin (kg/s)
- h = entalpi fluida (kJ/kg)

4. HASIL & PEMBAHASAN

1. Nilai Optimal Daya Berdasarkan Parameter Buka Valve

Data-data percobaan optimasi kondisi operasi turbin uap disajikan dalam tabel 1:

Tabel 1 Data-Data Percobaan Optimasi

Kondisi	P_{in} (barg)	T_{in} (°C)	P_{out} (bar)	T_{out} (°C)	h_{in} (kJ/kg)	h_{out} (kJ/kg)
1	7	398	1,5	200	3188,900	2872,900
2	7,5	407	1,5	210	3282,728	2892,85
3	8	420	1,5	215	3309,533	2902,825
4	8,5	452	1,5	220	3377,060	2912,800
5	9	464	1,5	230	3402,206	2932,75
6	9,5	472	1,5	240	3419,397	2952,700
7	10	481	1,5	245	3437,586	2962,712
8	10,5	493	1,5	250	3462,870	2972,725
9	11	515	1,5	255	3510,135	2982,737

Nilai data-data di atas kemudian dikonversikan menjadi nilai daya turbin sebagai berikut:

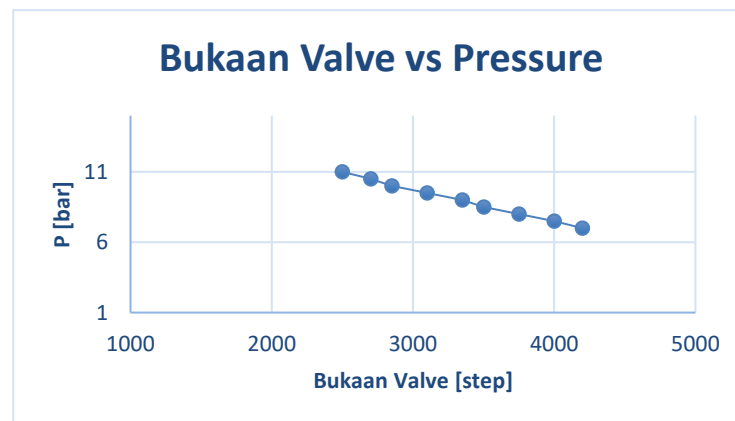
Tabel 2 Data Hasil Optimasi

Kondisi	Bukaan Valve (step)	Δh (kJ/kg)	\dot{m} (g/s)	P (J/s)
1	4200	316,000	0,902	285,071
2	4000	389,878	0,897	349,923
3	3750	406,708	0,897	364,879
4	3500	464,260	0,895	415,846
5	3350	469,456	0,893	419,462
6	3100	466,697	0,887	414,000
7	2850	474,874	0,886	421,011
8	2700	490,145	0,812	398,362
9	2500	527,397	0,742	391,526

Catatan : Nilai bukaan valve penuh = 7000 step.

Berdasarkan hasil yang disajikan pada tabel 2, didapatkan hasil bahwasanya nilai daya paling optimal didapatkan pada kondisi ke 7. Kondisi 7 yaitu pada bukaan valve sebesar 2850 (step), tekanan inlet (10 barg), dan laju alir sebesar 0,886 (g/s) yang menghasilkan daya sebesar 421,011 (J/s).

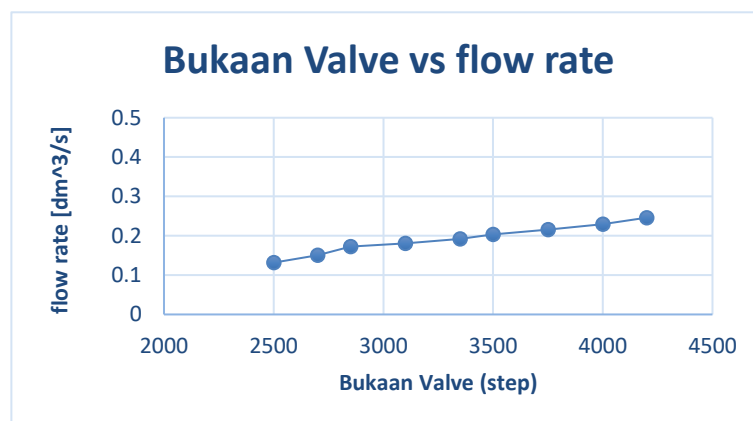
2. Hubungan Bukaan Valve Terhadap Pressure Steam



Gambar 3 Grafik Hubungan Bukaan Valve Terhadap Pressure Steam

Berdasarkan grafik yang disajikan pada gambar 3 didapatkan hubungan, bahwasanya semakin besar bukaan valve akan menurunkan nilai tekanan dari fluida yang melewati valve tersebut. Dimana menurunnya tekanan ini akan berpengaruh kepada nilai enthalpi yang dimiliki oleh fluida penggerak.

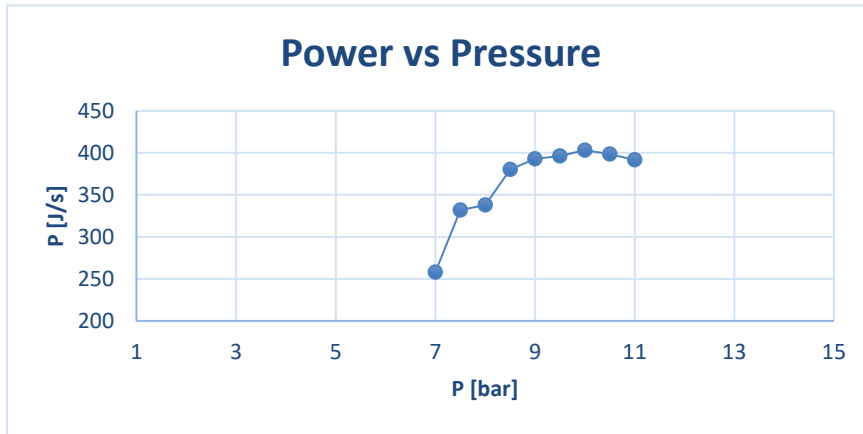
3. Hubungan Bukaan Valve Terhadap Flow Rate



Gambar 4 Grafik Hubungan Bukaannya Valve Terhadap Laju Alir steam

Berdasarkan grafik yang disajikan pada gambar 4 didapatkan hubungan, bahwasanya semakin besar bukaan valve akan menaikkan nilai laju alir dari fluida yang melewati valve tersebut.

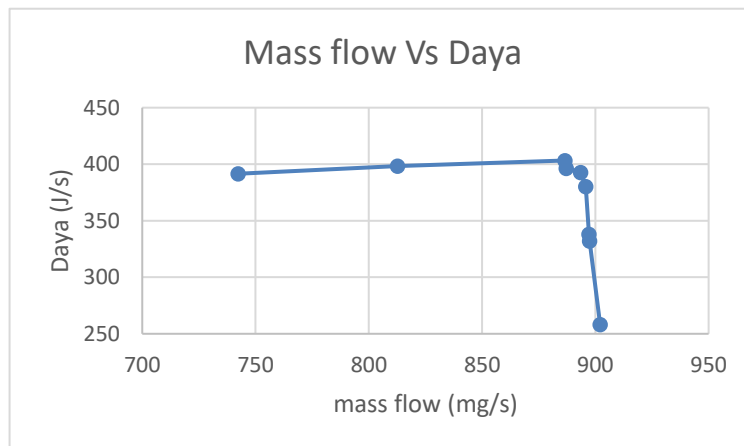
4. Hubungan Tekanan Terhadap Daya yang Dihasilkan



Gambar 5 Grafik Hubungan Tekanan Terhadap Daya yang Dihasilkan

Berdasarkan grafik yang disajikan pada gambar 5 didapatkan hubungan, bahwasanya terjadi fluktuasi pada hasil nilai tekanan terhadap daya (grafik berbentuk kurva dan memiliki titik puncak). Hal ini dikarenakan, nilai tekanan berpengaruh terhadap nilai enthalphy. Dimana nilai inilah yang menjadi salah satu parameter penentu nilai daya yang dihasilkan. Titik puncak pada grafik menandakan nilai optimal keseluruhan sistem. Grafik mengalami kenaikan pada data 1 sampai data 7. Namun, dapat dilihat pada setelah data ke 7 didapatkan nilai tekanan yang besar menghasilkan daya yang relatif stabil dengan daya pada data ke 7.

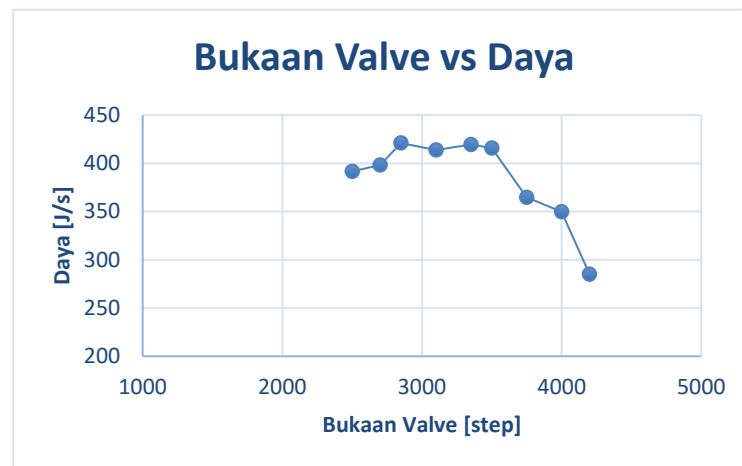
5. Hubungan Laju Alir Massa Terhadap Daya yang Dihasilkan



Gambar 6 Grafik Hubungan Laju Alir Massa Terhadap Daya yang Dihasilkan

Berdasarkan grafik yang disajikan pada gambar 6 didapatkan hubungan, bahwasanya terjadi fluktuasi pada hasil nilai laju alir massa terhadap daya (grafik berbentuk kurva dan memiliki titik puncak). Hal ini dikarenakan, nilai laju alir massa menjadi salah satu parameter penentu nilai daya yang dihasilkan. Titik puncak pada grafik menandakan nilai optimal keseluruhan sistem. Grafik mengalami kenaikan pada data 1 sampai data 3. Namun, dapat dilihat pada setelah data ke 3 didapatkan nilai laju alir yang besar menghasilkan daya yang kecil.

6. Hubungan Bukaannya Valve Terhadap Daya yang Dihasilkan



Gambar 7 Grafik Hubungan Bukaannya Valve Terhadap Daya Yang Dihasilkan

Berdasarkan grafik yang disajikan pada gambar 7 didapatkan hubungan, bahwasanya terjadi fluktuasi pada hasil nilai bukaan valve terhadap daya. Hal ini dikarenakan, nilai bukaan valve berpengaruh sekaligus terhadap nilai laju alir dan tekanan fluida. Dimana kedua nilai inilah yang menjadi parameter penentu nilai daya yang dihasilkan. Seiring meningkatnya nilai bukaan valve maka nilai laju alir juga akan meningkat. Namun di lain sisi, meningkatnya nilai bukaan valve ini akan menurunkan nilai tekanan fluida penggerak yang berujung menurunnya nilai perbedaan enthalpy sistem. Titik puncak pada grafik menandakan nilai optimal keseluruhan sistem.

5. KESIMPULAN

Daya Turbin uap dipengaruhi oleh nilai laju alir dan perbedaan *enthalpy* pada inlet dan outlet turbin. Dimana nilai enthalpy bergantung pada tekanan dan temperatur fluida penggerak yang mengalir pada sistem kerja. Sehingga daya turbin akan bergantung pada nilai tekanan *steam*. Seiring meningkatnya nilai bukaan valve maka nilai laju alir juga akan meningkat. Hal ini berbanding terbalik pada nilai tekanan, meningkatnya nilai bukaan valve akan menurunkan nilai tekanan fluida penggerak yang berujung menurunnya nilai perbedaan *enthalpy* sistem. Nilai perubahan tekanan (yang menghasilkan nilai enthalpy) memiliki pengaruh yang lebih besar daripada nilai laju alir massa. Hal ini dikarenakan nilai kandungan enthalpy pada steam yang bertekanan tinggi lebih besar sehingga berpengaruh besar pada daya yang dihasilkan dibandingkan dengan parameter laju alir massa.

Titik puncak pada grafik yang disajikan oleh gambar 5,6, dan 7 menandakan nilai optimal keseluruhan sistem. Pada percobaan ini didapatkan bahwasanya nilai daya optimal didapatkan ketika nilai bukaan valve sebesar 2850 (step), tekanan inlet (10 barg), dan laju alir sebesar 0,886 (g/s) yang menghasilkan daya sebesar 421,011 (J/s).

REFERENSI

1. AqshaBiyah, Sarwoko, MasIr.,M.Sc, & KurniawanEkkiS.T.,M.Sc., Realisasi Pembangkit Listrik Mini Tenaga Sampah. e-Proceeding of Engineering:Vol.2, 1942-1948.(2015).
2. Arismunandar, W. Penggerak Mula Turbin. 44. (2004).
3. Borman, G. L., & Ragland, K. W. *Combustion Engineering*. McGraww-Hill International Edition. (1988).
4. Bureau of Energy Efficiency, Ministry of Power, India. Boilers. 27-54. (2005).
5. DELTAWAY. *DELTAWAY Energy*. Diambil kembali dari DELTAWAY Waste and Biomass Power Plant Design and Operation: <https://deltawayenergy.com/2018/08/waste-to-energy-how-it-works/>.(2018, Agustus).
6. EECA Business. Energy Efficiency Best Practice Guide Steam Systems, Hot Water Systems and Process Heating Systems. 3-59. (2010).
7. Kristyawan. Update on waste reduction performance by waste to energy incineration pilot plant PLTSa Bantargebang operations. Jakarta: IOP Conference Series: Eart and Enviromental Science. (2021).

8. Moran, M. J., & Shapiro, H. N. *Fundamental of Engineering Thermodynamics*. USA: John Wiley and Sons.(2005).
9. Jurnal Teknologi Lingkungan, Vol.3, No. 1 Januari 2002 : 17-23
10. Pusat Pendidikan dan Pelatihan Jalan, Perumahan, Permukiman, dan Pengembangan Infrastruktur Wilayah. Pengantar Konversi Energi Thermal. *Modul Pengantar Konversi Energi Thermal dengan Teknologi WtE*, 53.(2018).
11. Rosmaini. Rancang Bangun Alat Incinerator untuk Pembakaran Limbah Infeksius Menggunakan Metode Primary and Secondary Chamber. 5-37. (2014).
12. Tansa Salmawaty, Asmara PBambang, Tolago I Ade, & Mohamad Yasin. Rancang Bangun Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA). Rancang Bangun Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA), 241-243.(2019).