

Perancangan dan Optimasi Desain Turbin Francis Pada Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro di Bendungan Jatibarang Kota Semarang.

Dibyو Setiawan *) La Ode M Firman **) Sorimuda Harahap ***)

Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Pancasila, Jakarta

Email: dibyosetiawan@gmail.com, button_island@yahoo.com, sorimuda81@gmail.com.

ABSTRAK

Bendungan Jatibarang adalah satu-satunya Bendungan yang berada di Kota Semarang Provinsi Jawa Tengah, ketersediaan air pada Bendungan memiliki potensi yang dapat dimanfaatkan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro. Tujuan penelitian ini melakukan perancangan turbin dan optimasi desainnya. Pelaksanaan penelitian meliputi: analisa desain debit, analisa tinggi jatuh air, mendesain *turbin francis*, serta mengoptimasi dengan pendekatan uji performansi bukaan sudu pengarah yang berbasis analisa segitiga kecepatan.

Hasil perancangan diperoleh debit desain sebesar $0,75\text{m}^3/\text{detik}$, tinggi jatuh efektif $65,95\text{ m}$, diameter pipa pesat $\varnothing 0,645\text{ m}$, daya turbin rencana $434,278\text{ kW}$, kecepatan spesifik 280 rpm , putaran turbin $2526,18\text{ rpm}$, diameter luar turbin $\varnothing 0,271\text{ m}$, diameter dalam turbin $\varnothing 0,199\text{ m}$, lebar turbin $0,074\text{m}$, jumlah sudu turbin 11 buah, jumlah sudu pengarah 10 buah, diameter peletakan sudu pengarah berada pada $\varnothing 329,22\text{ m}$ dari titik pusat rotasi turbin, panjang sudu pengarah $0,104\text{ m}$, diameter poros $\varnothing 0,020\text{m}$, torsi rencana pada poros 1.4782N.m , diameter masuk pipa pesat ke spiral case $\varnothing 0,306\text{ m}$, diameter masuk spiral case ke sudu turbin $\varnothing 0,163\text{ m}$, dimensi keluar draft tube air ke kolam penenang $0,433\text{ m} \times 0,349\text{ m}$, hasil analisa berbasis segitiga kecepatan diperoleh sudut $\alpha 1\ 37,18^\circ$, $\beta 1\ 101,49^\circ$, $\beta 2\ 47,20^\circ$, selanjutnya untuk meningkatkan gaya, torsi, daya dan efisiensi maka diperlukan optimasi desain turbin francis dengan cara perhitungan matematis uji coba bukaan mulai dari sudut $\alpha 1\ 32,18^\circ$ hingga $40,18^\circ$, sebagai perbandingan hasil dilakukan kembali optimasi full factorial dengan variabel 3 pangkat 3 sehingga diperoleh 27 kondisi desain sudut $\alpha 1\ (32,18^\circ, 36,18^\circ, 40,18^\circ)$ sudut $\beta 1\ (42,70^\circ, 50,63^\circ, 54,07^\circ)$ dan sudut $\beta 2\ (101,99^\circ, 104,76^\circ, 107,74^\circ)$.

Hasil yang diperoleh antara metode bukaan sudu pengarah dan full factorial menunjukkan hasil yang sama dimana sudut optimum berada pada sudut $\alpha 1\ 32,18^\circ$, $\beta 1\ 105,49^\circ$, $\beta 2\ 47,20^\circ$, dengan hasil gaya $F\ 7,53\text{ N.m}$, torsi $T\ 1.61\text{ Kg.m}$, daya $P\ 424,83\text{ kW}$, efisiensi $\eta_o\ 0,88$, sehingga optimasi yang dilakukan dapat meningkatkan performa sebesar 11%.

Kata kunci : *turbin francis, segitiga kecepatan turbin, efisiensi turbin.*

ABSTRACT

Jatibarang Dam is the only Dam in the City of Semarang, Central Java Province, the availability of water in the Dam has the potential that can be utilized as a Minihidro Power Plant. The purpose of this research is to design turbine and optimize its design. The research carried out included: analysis of discharge design, analysis of water fall height, designing a Francis turbine, and optimizing with the performance approach of the directional blade opening based on a speed triangle analysis.

The design results obtained design discharge of $0.75\text{m}^3/\text{sec}$, effective fall height 65.95 m , pipe diameter rapidly $\varnothing 0.645\text{ m}$, planned turbine power $434,278\text{ kW}$, specific speed 280 rpm , turbine rotation 2526.18 rpm , outer diameter of turbine $\varnothing 0,271\text{ m}$, diameter of turbine $\varnothing 0,199\text{ m}$, width of turbine 0.074m , number of turbine blades 11 pieces, number of directing blades 10 pieces, diameter of laying the direction of blades are at $\varnothing 329.22\text{ m}$ from the center of the turbine rotation, direction of blades 0.104 m , diameter shaft $\varnothing 0,020\text{m}$, planned torque at shaft 1.4782Nm , diameter of pipe entering rapidly into the spiral case $\varnothing 0.306\text{ m}$, diameter of the spiral case entering the turbine blade $\varnothing 0.163\text{ m}$, dimensions of the draft tube exit to the sedation pond $0.433\text{ mx } 0.349\text{ m}$, results of analysis based on velocity triangle obtained angle $\alpha 1\ 37.18^\circ$, $\beta 1\ 101.49^\circ$, $\beta 2\ 47.20^\circ$, then to increase the force, torque, power and efficiency it is necessary to optimize the design of the french turbine by mathematical calculation of a trial opening from the angle of $\alpha 1\ 32.18^\circ$ up to 40.18° , as a comparison of results the full factorial optimization is re-done with 3 rank 3 variables to obtain

27 angular design conditions α_1 (32.18 °, 36.18 °, 40.18 °) angle β_1 (42.70 °, 50 , 63 °, 54.07 °) and angles β_2 (101.99 °, 104.76 °, 107.74 °).

The results obtained between directing blade and full factorial opening methods show the same results where the optimum angle is at α_1 32.18°, β_1 105.49°, β_2 47.20 °, with the result of F force 7.53 Nm, T torque 1.61 Kg. m, power P 424.83 kW, efficiency η 0.88, so the optimization can improve performance by 11%.

Keywords : francis turbines, turbine speed triangles, turbine efficiency.

I. PENDAHULUAN

Kota Semarang dalam kurun waktu 29 tahun telah dilakukan serangkaian kajian strategik penanganan banjir dimana kajian tersebut dilaksanakan mulai dilakukan dari tahun 1960 hingga tahun 1990. Kaligarang Kota Semarang telah terjadi sepuluh kali banjir yang mengakibatkan kerugian besar, menindaklanjuti hal tersebut Pemerintah Daerah dan Pusat berupaya mencari solusi penanganan banjir di Kota Semarang dengan cara bekerjasama dengan Pemerintah Jepang membuat suatu *Grand Desain* penanganan banjir Kota Semarang. Pemerintah Jepang melalui (J) mengirim tim untuk merumuskan rencana induk dan melakukan kajian pada proyek prioritas, kerjasama kajian dengan (J) dilakukan selama satu tahun mulai dari tahun 1992 hingga tahun 1993[1]. Kajian ini dinamakan "Rencana Induk Pengembangan Sumber Daya Air dan Studi Kelayakan" sebagai solusi pengendalian banjir dan penataan drainase perkotaan di Kota Semarang". Hasil studi tersebut menghasilkan rekomendasi dimana rekomendasi berisikan perlu dilakukan *Design Multi Purpose Dam*[2]. Bendungan ini di desain sebagai fungsi penanganan banjir selain fungsi utama dalam penanganan banjir, bendungan ini juga dapat digunakan sebagai objek wisata, pemanfaatan air irigasi dan pembangkit listrik.

Bendungan Jatibarang selesai konstruksi pada tahun 2014 dimana memiliki daerah tangkapan air sebesar 54 km², luas genangan 189 Ha, kapasitas tampungan total air sebesar 20,4 juta m³, dan elevasi puncak 157 m. Pada tahun 2015 pembangunan Bendungan jatibarang telah selesai dan telah beroperasi. Pembangunan yang dilakukan meliputi *reservoir*, tubuh bendung, saluran pengelak, *spillway*, terowongan *gallery*, jembatan akses ke Goa Kreo, Kantor pengelola dan *intake* pengambilan air untuk pembangkit

listrik. Sehubungan dengan hal tersebut, dengan adanya ketersediaan air, beda ketinggian dan belum dilakukan pembangunan pembangkit listrik pada Bendungan Jatibarang. Peneliti merasa penting untuk melakukan penelitian dalam perancangan dan optimasi desain turbin Pada pembangkit listrik tenaga air dalam rangka ikut serta melakukan kajian keberlanjutan sebagai informasi bagi Kota Semarang.

Berdasarkan identifikasi permasalahan diatas, maka penelitian ini difokuskan pada beberapa faktor, yaitu menganalisa debit yang tersedia untuk penggunaan pembangkit listrik tenaga air, serta merancang turbin air pada pembangkit listrik tenaga air, dan mengoptimasi desain turbin air yang dapat diuraikan sebagai berikut:

- Menganalisis ketersediaan air berdasarkan data klimatologi selama sepuluh tahun mulai tahun 2007 hingga 2016 melalui pendekatan metode *penman* dan metode *F.J Mock* serta memperhatikan faktor kelestarian air pada bendungan;
- Desain debit dan pipa pesat telah diperoleh selanjutnya dilakukan desain turbin dimana perancangan turbin ini terdiri dari rancangan putaran turbin, kecepatan spesifik, katup, sudu turbin, poros turbin, sudu pengarah (*guide vanes*), *spiral case*, dan *draft tube*;
- Setelah rancangan turbin diperoleh selanjutnya dilakukan perhitungan segitiga kecepatan dalam turbin untuk dapat mengetahui kecepatan yang terjadi serta menentukan sudut α_1 , β_1 , dan β_2 ;
- Untuk meningkatkan daya, selanjutnya peneliti melakukan optimasi desain turbin untuk memperoleh gaya torsi dan daya maksimal dengan melakukan variasi pembukaan sudu pengarah (sudut α^0)

kemudian dilakukan analisa berbasis segitiga kecepatan pada turbin;

- Dari rentang sudut yang diperoleh kemudian dilakukan kembali optimasi desain menggunakan metode eksperimen *full factorial* dengan kondisi desain 3 pangkat 3 sehingga diperoleh kondisi desain sebanyak 27 kondisi;
- Melakukan validasi menggunakan pendekatan komputasi fluida dinamis menggunakan *CFD* pada *Software Solidwork*; lalu membandingkan hasil perancangan dan proses optimasi.

Sebelum memulai penelitian ini, maka peneliti membandingkan terhadap penelitian yang sebelumnya pernah dilakukan dengan membaca dari jurnal-jurnal penelitian sebelumnya yang akan diuraikan seperti dibawah ini:

- Penelitian ini membahas secara konvensional dalam menilai kinerja turbin dimana perlu dilakukan suatu model eksperimen, untuk model yang tersedia di buat dalam beberapa alternatif desain untuk optimasi desain. Teknik desain sepenuhnya berupa 3 (tiga) dimensi simulasi aliran dilakukan untuk memperoleh sudu turbin yang baru melalui pengembangan. Sehingga memungkinkan peningkatan dan optimasi komponen turbin yang dapat memiliki torsi tinggi dan efisien. Sistem yang sudah diterapkan pada optimasi sudu turbin Francis berguna untuk proyek pendekatan turbin. Selanjutnya digunakan pendekatan analisis menggunakan perangkat lunak *ANSYS CFX computational fluid dynamics (CFD)*. Sudu turbin yang telah dikembangkan dari *reverse engineering* dan menggunakan *CFD* menunjukkan peningkatan kinerja. Nilai rata-rata ataupun parameter aliran seperti kecepatan dan sudut aliran pada *inlet* dan *outlet* sudu turbin, sudu pengarah dan sudu turbin dihitung untuk menurunkan karakteristik aliran. Tujuannya adalah menganalisis fenomena aliran dan distribusi tekanan untuk lebih menyempurnakan seluruh eksperimen numerik mencapai tingkat akurasi yang

diperlukan untuk desain konsep turbin yang direvitalisasi. Yang diperoleh hasilnya sesuai dengan eksperimen di tempat, terutama untuk kurva karakteristik turbinnya[3].

- Penelitian difokuskan pada elemen turbin yang tidak terkait dengan sudu turbin pada profil sudu, seperti penutup, sudu tetap/bilah panduan dan zona tertentu sudu turbin. Kedua tahap pekerjaan difokuskan pada peningkatan profil sudu. Untuk tujuan ini, karena kompleksitas geometri, sebuah metodologi yang menggabungkan eksperimen faktorial, *Artificial Neural Networks(ANN)*, dan optimasi berdasarkan Algoritma Genetika (GA) dilakukan implementasi. Pada tahap pertama dari proses tersebut modifikasi bertujuan meningkatkan efisiensi dengan enam poin parameter. Resirkulasi cairan dan fenomena kavitasi di sudu turbin berkurang, yang terakhir menjadi penyebab utama keausan di sudu turbin. Geometri akhir disimulasikan menggunakan pendekatan *CFD*, dengan peningkatan diperkirakan 14,77% dalam efisiensi titik saat ini untuk kekuatan tertinggi. Selanjutnya kekuatan statis, kelelahan dan resonansi diverifikasi dalam komponen turbin dipengaruhi oleh modifikasi[4].
- Penelitian yang membahas mengenai perancangan dan optimalisasi turbin air dengan memanfaatkan sumber energi air sungai tiwingan yang memiliki ketinggian yang tersedia 18 meter dengan tinggi jatuh efektif 12,1 meter, debit 0,33m³/detik dengan potensi daya listrik 8,5 kW. Dari analisa yang diperoleh jenis turbin yang sesuai adalah jenis kondisi tersebut adalah turbin *Crossflow*, alasan teknis dipilihnya jenis turbin tersebut dikarenakan ketersediaan teknologi secara lokal dan biaya pembuatan yang lebih murah metode yang dipakai adalah menganalisa segitiga kecepatan pada bagian sudu turbin dengan variasi sudut α , dari sudut α 7° hingga 16° dengan mengambil sudut aliran α 14° sebagai contoh rancangan. Hasil yang diperoleh dari pengambilan sampel sudu

aliran $\alpha 14^\circ$ adalah $F=12.09 \text{ Nm}$, $\tau =5,74 \text{ N.m}$, $P=89.45 \text{ kW}$ ini merupakan sudut optimum dimana gaya, torsi dan daya diperoleh maksimum[5].

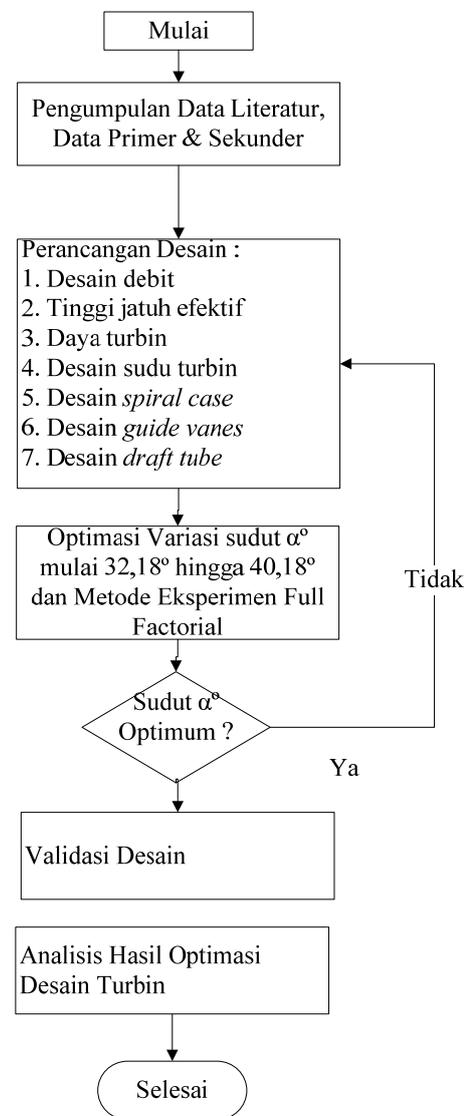
- Penelitian ini adalah bagaimana cara memilih jenis turbin, dengan potensi ketinggian efektif 12 m, kecepatan spesifik 500 rpm dan debit aliran minimum 0.283 m^3/s yang bertujuan untuk dapat meningkatkan daya listrik yang diperoleh dan efisiensi maksimalnya. Dari data sumber energi yang tersedia, perhitungan segitiga kecepatan pada aliran masuk dan keluar turbin digunakan untuk mendapatkan gaya, torsi dan daya maksimal pada suatu turbin. Perhitungan dilakukan pada kecepatan spesifik sehingga diperoleh jenis turbin air tipe *crossflow* (aliran Silang) melalui perancangan dan mendapatkan jenis turbin yang sesuai maka dilakukan analisis jenis penggerak mula pembangkit listrik tenaga air. Metode optimasi menggunakan *full factorial* dengan data Sudut masuk (alfa) α_1° : $14^\circ, 16^\circ, 18^\circ$, Sudut relatif air keluar (beta) β_2° : $90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ dan Sudut relatif air masuk (beta) β_1° : $30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$. Hasil optimasi yang diperoleh dengan menggunakan metode *full factorial* Sudut masuk (alfa) α_1° : 14° , Sudut relatif air keluar (beta) β_2° : 150° dan Sudut relatif air masuk (beta) β_1° : 30° Sehingga daya yang diperoleh sebesar 31,03 kW[6].

Tujuan dari penelitian ini yaitu bertujuan untuk menganalisa debit desain untuk penggunaan pembangkit listrik tenaga air, merancang turbin air pada pembangkit listrik tenaga air, mengoptimasi desain turbin air dengan variasi bukan sudu pengarah (sudut α_1), kemudian dilakukan analisa berbasis segitiga kecepatan untuk memperoleh gaya, torsi dan daya maksimum, mengoptimasi desain kembali dengan analisa metode eksperimen *full factorial* dengan kondisi desain 33 sehingga diperoleh kondisi desain sebanyak 27 kondisi, memvalidasikan menggunakan pendekatan komputasi fluida dinamis menggunakan CFD pada *Software Solidwork*.

Sedangkan manfaat dari penelitian ini yaitu diharapkan dapat bermanfaat untuk Pemerintah Kota Semarang sebagai riset berkelanjutan dari pengelolaan sumber daya air, dan juga diharapkan mampu menambah wawasan bagi peneliti lainnya yang membutuhkan informasi terkait riset tentang energi baru terbarukan pada bidang pembangkit listrik tenaga air.

II. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dilakukan didalam penelitian ini digambarkan pada diagram alir penelitian yang ditunjukkan oleh gambar.1 dibawah ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

Penelitian ini dilakukan selama 4 bulan pada Bendungan Jatibarang yang terletak di Kecamatan Gunung Pati dan Kecamatan Mijen wilayah kota administrasi Semarang Jawa Tengah, tepatnya di Sungai Kreo DAS Kali Garang kira-kira 13 km ke arah hulu dari pertemuan Kali Kreo dengan Kali Garang serta 23 km dari sungai Banjir Kanal Barat.

Langkah pertama yang dilakukan didalam penelitian ini yaitu mengumpulkan studi literatur, data primer, dan data sekunder.

Langkah berikutnya yaitu menghitung debit desain/debit andalan yang diuraikan sebagai berikut:

- Pengambilan data sekunder berupa data klimatologi mengacu pada aturan hidrologi pada studi kelayakan pembangkit listrik tenaga air dimana pengambilan data 1 stasiun hujan diperbolehkan apabila lokasi penelitian dan stasiun hujan berjarak dibawah 10 km, untuk kasus pada penelitian ini jarak dari lokasi penelitian Bendungan Jatibarang ke stasiun hujan Bandara Ahmad Yani Kota Semarang memiliki jarak kurang dari 10m tepatnya 8,9 km sehingga data ini dapat digunakan dalam penelitian; Data klimatologi yang telah diperoleh berupa curah hujan, temperatur udara, kelembaban udara, penyinaran matahari, kecepatan angin t.0,5m, dan kecepatan angin t.2m dicari nilai minimum, rata-rata dan maksimumnya;
- Angka evapotranspirasi telah diketahui, selanjutnya data tersebut dimasukkan ke dalam tabel perhitungan ketersediaan air dimana dalam perhitungan ketersediaan air peneliti menggunakan pendekatan metode F. J. Mock, angka evapotranspirasi dimasukkan bertujuan untuk menganalisis ketersediaan air yang dapat digunakan untuk kebutuhan pembangkit listrik atau disebut juga debit desain/debit andalan;
- Angka debit desain/debit andalan telah diperoleh tetapi masih bersifat rekapitulasi data desain debit/debit andalan 10 tahun untuk mengerucutkan hal tersebut peneliti melakukan inventarisasi angka dengan

mengurutkan mulai dari angka terendah hingga tertinggi menggunakan pendekatan peluang weibul, California dan BBLV;

- Selanjutnya yang terakhir adalah memilih debit desain/debit andalan yang memiliki persentase 90 berada pada angka 0,75 m³/detik atau disebut Q90. Adapun justifikasi peneliti dalam menetapkan Q90 karena faktor keberhasilan dalam mendistribusikan air memiliki persentase keberhasilan 90% dan persentase kegagalan sebesar 10%.

Langkah berikutnya yaitu menganalisis perancangan pembangkit listrik tenaga mikrohidro setelah di peroleh angka debit desain, yang selanjutnya dilakukan perhitungan perancangan sistem mekanik pembangkit listrik tenaga minihidro. Setelah dilakukan analisa perancangan mekanik selanjutnya membuat gambar berdasarkan dimensi yang di peroleh saat perancangan.

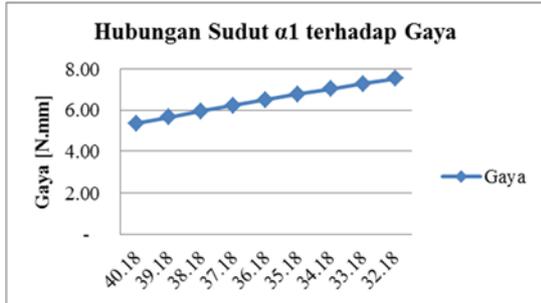
Langkah selanjutnya yaitu analisis bukaan sudut α . metode bukaan sudut α pada sudu pengarah berdasarkan segitiga kecepatan. Metode ini telah digunakan beberapa peneliti yang membahas tentang turbin air untuk mengetahui perubahan kecepatan. Rancangan eksperimen yang digunakan adalah desain bukaan sudut α mulai dari sudut 32,18° hingga 40,18°. Desain ini memungkinkan percobaan untuk mempelajari respon kecepatan pada tiap pembukaan sudu pengarah. Analisatersebut juga dapat berfungsi untuk mengetahui batasan atau ketetapan variabel pada desain optimasi selanjutnya dimana metode optimasi selanjutnya menggunakan Metode eksperimen *full factorial*.

Langkah berikutnya yaitu metode optimasi desain. Pada metode optimasi desain ini didapatkan dengan cara analisis *full factorial* dan validasi analisis dengan bantuan perangkat lunak CFD dan CFX Ansys.

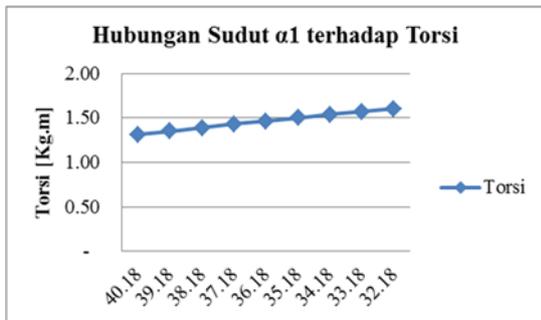
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan perkiraan bukaan dari referensi yang ada untuk turbin francis berkecepatan tinggi berada di kisaran sudut bukaan α 1° mulai dari 32° hingga 40°. Dari data

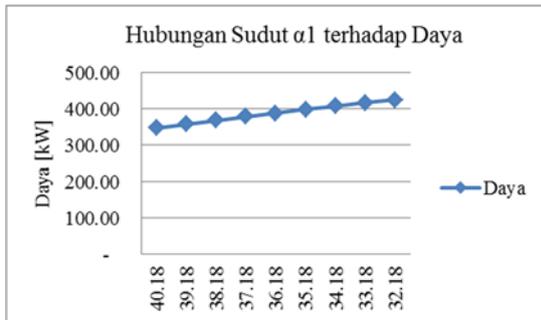
simulasi berdasarkan matematis tersebut diperoleh grafik hubungan Gaya, Torsi, Daya dan efisiensi terhadap bukaan sudut $\alpha 1^\circ$, seperti ditampilkan oleh grafik pada gambar.1 s/d gambar.4 sebagai berikut.



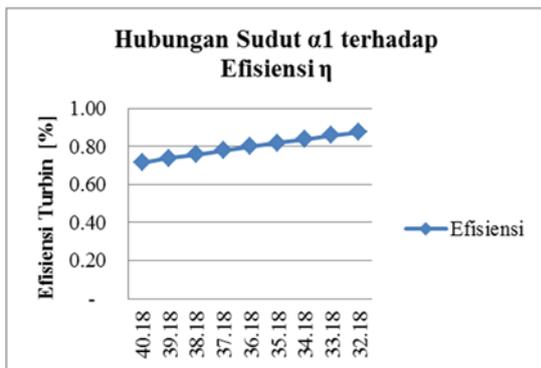
Gambar 1. Grafik hubungan sudut $\alpha 1$ terhadap Gaya.



Gambar 2. Grafik hubungan sudut $\alpha 1$ terhadap Torsi.



Gambar 3. Grafik hubungan sudut $\alpha 1$ terhadap Daya.



Gambar 4. Grafik hubungan sudut $\alpha 1$ terhadap Efisiensi Turbin.

Berdasarkan dari perbandingan kalkulasi teoritis dan kalkulasi segitiga kecepatan terdapat selisih dimana antara kalkulasi teoritis dan kalkulasi segitiga kecepatan terdapat perbedaan. Selisih antara kedua kalkulasi pada nilai F sebesar 3.37 N.m, seperti yang ditunjukkan oleh tabel.1 dibawah ini.

Tabel 1. Perbandingan hasil perhitungan teoritis dengan perhitungan segitiga kecepatan.

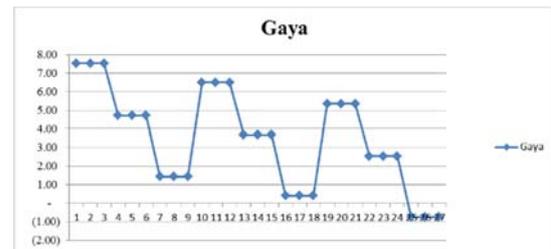
No	Notasi	Kalkulasi Teoritis	Kalkulasi Segitiga Kecepatan	Selisih	Peningkatan 32,18° - 40,18°	Satuan	Selisih
1	F	9.59	6.22	3.37	7.53	N.m	1.31
2	T	1.48	1.43	0.05	1.61	N.m	0.18
3	P	390.85	378.16	12.69	424.83	kW	46.68
4	η_o	0.90	0.86	0.03	0.88	%	0.01

Sedangkan tabel.2 dibawah ini menunjukkan hasil perhitungan dengan menggunakan *full factorial* 3^3-27 kondisi desain.

Tabel 2. Perhitungan *full factorial* 3^3-27 kondisi desain.

Kode	Variabel Bebas	Level 1	Level 2	Level 3
a	Sudut air masuk Alfa $\alpha 1^\circ$	32.18	36.18	40.18
b	Sudut relatif air keluar (Beta) $\beta 2^\circ$	47.20	50.63	54.07
c	Sudut relatif air masuk (Beta) $\beta 1^\circ$	101.99	104.76	107.74

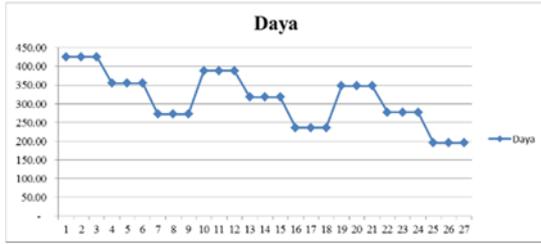
Sedangkan hubungan variasi kondisi dari perhitungan *full factorial* terhadap gaya, torsi, daya, dan efisiensi ditunjukkan oleh grafik pada gambar.5 s/d gambar8 berikut.



Gambar 5. Grafik hubungan variasi kondisi *full factorial* terhadap Gaya.



Gambar 6. Grafik hubungan variasi kondisi *full factorial* terhadap Torsi.



Gambar 7. Grafik hubungan variasi kondisi *full factorial* terhadap Daya.



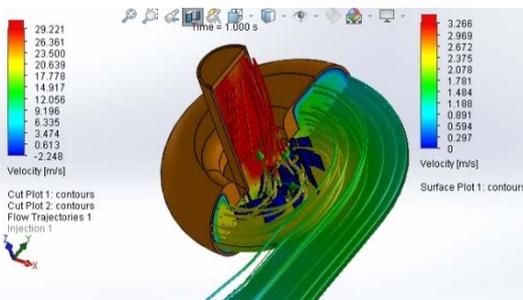
Gambar 8. Grafik hubungan variasi kondisi *full factorial* terhadap Efisiensi Turbin.

Hasil optimasi berbasis bukaan sudu dengan menggunakan *full factorial* disajikan oleh tabel.3 seperti dibawah ini.

Tabel 3. Perbandingan metode optimasi bukaan sudu dengan *full factorial*.

No	Notasi	Peningkatan Full Factorial α_1, β_1	Peningkatan Bukaan Sudu β_2	Selisih	Satuan
1	F	7.53	7.53	-	N.m
2	T	1.61	1.61	-	N.m
3	P	424.83	424.83	-	kW
4	η_o	0.88	0.88	-	%

Didalam melakukan analisis desain maka diperlukan gambar dalam bentuk tiga dimensi dengan menggunakan bantuan perangkat lunak CFD dan CFX Ansys, seperti yang ditampilkan oleh gambar.9 berikut.



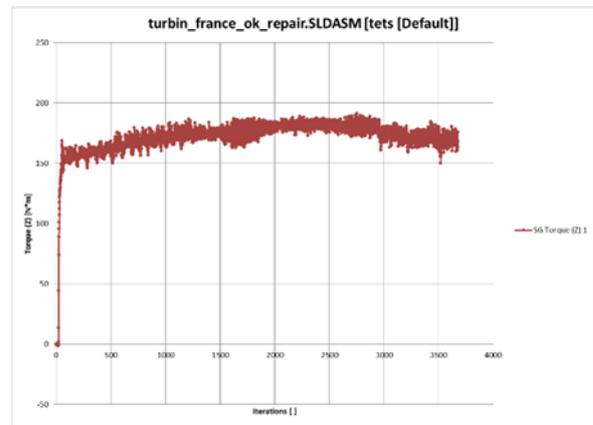
Gambar 9. Penggambaran tiga dimensi untuk analisis validasi desain.

Sedangkan *goals* dari analisis dengan menggunakan bantuan perangkat lunak CFX Ansys disajikan oleh tabel.4 berikut.

Tabel 4. Tabel *Analysis result goals*.

Name	Unit	Delta	Progress	Criteria	Value	Use in convergence
GG Normal Force	N	386193.147	100	18146.3884	7.4357571	On
GG Torque (Z)	N*m	622130.333	100	38617.8193	1.5696034	On

Sedangkan grafik dari hasil analisis dengan menggunakan bantuan perangkat lunak CFX Ansys disajikan oleh gambar.10 berikut.



Gambar 10. Grafik hasil *analysis result goals*.

Sedangkan *goals* dari hasil analisis pada kondisi desain dengan menggunakan bantuan perangkat lunak CFX Ansys disajikan oleh tabel.5 dan tabel.6 dibawah ini.

Tabel 5. Tabel *goals* hasil dari *Analysis result goals*.

Kondisi Desain	α_1°	β_2°	F	T	ω	P (kW)	η_b	η_m	η_o
Validasi Ansys	32.18	47.20	7.44	1.57	264.41	415.01	1.64	0.52	0.86
Full Factorial	32.18	47.20	7.53	1.61	264.41	424.83	1.64	0.53	0.88

Tabel 6. Tabel *goals* hasil dari *Analysis result goals*.

No	Notasi	Peningkatan Bukaan Sudu $32,18^\circ - 40,18^\circ$	Peningkatan Full Factorial α_1, β_1 dan β_2	Validasi	Selisih	Satuan
1	F		7.53	7.53	7.44	0.09 N.m
2	T		1.61	1.61	1.57	0.04 N.m
3	P		424.83	424.83	415.01	9.82 kW
4	η_o		0.88	0.88	0.86	0.02 %

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan beberapa kesimpulan, yaitu potensi ketersediaan air yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik tenaga air sebesar $0,75 \text{ m}^3/\text{detik}$. Diameter pipa pesat yang diperoleh sebesar $\varnothing 0,645 \text{ m}$, panjang pipa pesat 390 m , tebal pipa pesat $0,175 \text{ m}$ tetapi menurut standar minimum ketebalan minimum yang diizinkan 6 mm , elevasi muka air minimum 138 m – elevasi rencana penempatan pipa pesat $124 \text{ m} = 14 \text{ m}$ dan sudut elevasi pipa pesat = 50° . Tinggi jatuh air yang tersedia sebesar $65,99 \text{ m}$, kerugian pada trash rack diperoleh sebesar $0,0346 \text{ m}$, kerugian pada akibat gesekan diperoleh sebesar $0,00207 \text{ m}$, kerugian pada akibat belokan diperoleh sebesar $0,0000000253 \text{ m}$, Kerugian energi total diperoleh sebesar $0,0366 \text{ m}$ Sehingga tinggi jatuh efektif sebesar $65,95 \text{ m}$.

Daya teoritis dengan debit desain sebesar $0,75 \text{ m}^3/\text{detik}$, tinggi jatuh efektif yang memiliki tinggi $65,95 \text{ m}$, massa jenis air 1000 kg/m^3 dan percepatan gravitasi $9,81 \text{ m/s}^2$. Semua komponen dihitung dengan mengalikan, hasil perkalian tersebut diperoleh daya sebesar $485,227 \text{ kW}$, $\eta_t = 1 \times 0,895 = 0,895$ atau $89,5\%$ dan Dari daya tersebut diperoleh klasifikasi pembangkit listrik dimana klasifikasi dapat dilihat berdasarkan tabel dari hasil daya yang diperoleh sebesar $434,278 \text{ kW}$ masuk dalam pembangkit listrik tenaga minihidro. P_g (kalkulasi 1) $407,884 \text{ kW}$, P_g (kalkulasi 2) $407,65 \text{ kW}$, P_g (kalkulasi 3) $411,77 \text{ kW}$ sehingga $\eta_g = 0,948$ atau dalam persen adalah 95% , $P_f = 0,948$ atau (95%) Selanjutnya P_g' (generator) = $433,44 \text{ kW}$. Kecepatan spesifik $N_s = 279,70 \text{ rpm}$ atau di bulatkan menjadi 280 rpm , dan Putaran turbin $N = 2526,18 \text{ rpm}$. Berdasarkan kurva hubungan kecepatan spesifik turbin yang cocok adalah turbin francis.

Diameter luar sudu turbin $D_3 = 0,271 \text{ m}$, diameter dalam sudu sudu turbin $D_1 = 0,199 \text{ m}$, diameter tengah sudu turbin $D_2 = 0,255 \text{ m}$, tinggi turbin $H_1 = 0,044 \text{ m} + H_2 = 0,0271 \text{ m}$ sehingga $H = 0,4671 \text{ m}$, jumlah banyaknya sudu turbin sebanyak (Z_1) = 11 buah, tebal dinding sudu turbin (t_1) = 77 mm dan jarak antar sudu turbin (s_1) = $2,47 \text{ mm}$ atau dibulatkan menjadi 3 mm . Jumlah sudu pengarah (Z_0) 10 buah, Panjang sudu pengarah $L_{gv} = 112,5 \text{ mm}$, Putaran $\omega = 264,41 \text{ rad/detik}$, rasio putaran $\omega = 7,35 \text{ rad/detik}$, Rasio debit $Q = 26,97$,

$\Omega = 38,17$ Sehingga $D_o = \varnothing 329,22 \text{ mm}$ dibulatkan menjadi $\varnothing 330 \text{ mm}$.

Dimensi spiral case hasil desain adalah sebagai berikut : A $0,306 \text{ m}$, B $0,350 \text{ m}$, C $0,405 \text{ m}$, D $0,453 \text{ m}$, E $0,340 \text{ m}$, F $0,398 \text{ m}$, G $0,334 \text{ m}$, H $0,293 \text{ m}$, I $0,076 \text{ m}$, L = $0,276 \text{ m}$ dan M $0,163 \text{ m}$. Dimensi spiral case hasil desain adalah sebagai berikut : N $0,614 \text{ m}$, O $0,361 \text{ m}$, P $0,329 \text{ m}$, Q $0,179 \text{ m}$, R $0,433 \text{ m}$, S $1,25 \text{ m}$, T $0,420 \text{ m}$, U = $0,085 \text{ m}$, V $0,349 \text{ m}$ dan Z $0,745 \text{ m}$.

Perhitungan daya rencana $P_d = 390,850 \text{ kW}$, Perhitungan torsi $M_p = 1.4782 \text{ N.m}$, Perhitungan tegangan geser yang diizinkan $\sigma_a = 4,88 \text{ kg.mm}^2$, Perhitungan dimensi diameter poros $D_s = \varnothing 16,62$ dibulatkan menjadi $\varnothing 20 \text{ mm}$, Pemeriksaan kekuatan poros $\tau_g = 1,62 \text{ N/mm}^2$, $F = 4076,28 \text{ N.m}$.

Angka bukaan berdasarkan segitiga kecepatan berada di sudut $\alpha = 37,18^\circ$ dengan hasil gaya turbin berdasarkan segitiga kecepatan $F = 6,22 \text{ N.m}$, torsi turbin berdasarkan segitiga kecepatan $T = 1,43 \text{ kg.m}^2$, daya turbin berdasarkan segitiga kecepatan $P = 378,16 \text{ kW}$, efisiensi hidraulik berdasarkan segitiga kecepatan $\eta_h = 1,54$, efisiensi mekanikal berdasarkan segitiga kecepatan $\eta_m = 0,50$, sehingga efisiensi operasi turbin berdasarkan segitiga kecepatan $\eta_o = 0,78$.

Angka bukaan optimum berada di sudut $\alpha = 32,18^\circ$ dengan hasil gaya turbin berdasarkan segitiga kecepatan $F = 7,53 \text{ N.m}$, torsi turbin berdasarkan segitiga kecepatan $T = 1,61 \text{ kg.m}$, daya turbin berdasarkan segitiga kecepatan $P = 424,83 \text{ kW}$, efisiensi hidraulik berdasarkan segitiga kecepatan $\eta_h = 1,64$, efisiensi mekanikal berdasarkan segitiga kecepatan $\eta_m = 0,53$, sehingga efisiensi operasi turbin berdasarkan segitiga kecepatan $\eta_o = 0,88$ selanjutnya dari optimasi ini dapat disimpulkan dapat meningkatkan daya sebesar 11% dari keadaan semula dan dapat disimpulkan juga semakin kecil bukaan maka semakin tinggi putaran turbin dan semakin besar daya yang dihasilkan.

Hasil validasi dengan data masukan sudut $\alpha = 32,18^\circ$ diperoleh hasil gaya turbin berdasarkan segitiga kecepatan $F = 7,44 \text{ N.m}$, torsi turbin berdasarkan segitiga kecepatan $T = 1,57 \text{ kg.m}$, daya turbin berdasarkan segitiga kecepatan $P = 415,01 \text{ kW}$, efisiensi hidraulik berdasarkan segitiga

kecepatan η_h 1,64, efisiensi mekanikal berdasarkan segitiga kecepatan η_m 0,52, sehingga efisiensi operasi turbin berdasarkan segitiga kecepatan η_o 0,86 selanjutnya dari validasi desain tersebut dapat disimpulkan bahwa hasil validasi memperoleh angka selisih daya sebesar 0.02 dimana hasil tersebut tidak lebih dari 10% yang artinya desain valid dijadikan pendekatan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. J. L. d. P. E. Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, Pedoman Studi Kelayakan Hidrologi, Jakarta: Integrated Microhydro Development and Application Program, 2009.
- [2] J. Planchot, M. Lenoir, S. I. Wahyudi and H. P. Adi, "The Engineering Important Components of Jatibarang Dam, Semarang, Indonesia," in *Proceeding International Conference*, Semarang, Indonesia, 2015.
- [3] H. J. Choi, M. A. Zullah, H. W. Roh, S. Y. Oh and Y. H. Lee, "CFD Validation of Performance Improvement of a 500 kW Francis Turbine," *Elsevier Renewable Energy*, vol. 54, pp. 111-123, 2013.
- [4] L. A. Teran, F. J. Larrahondo and S. A. Rodriguez, "Performance Improvement of a 500-kW Francise Turbine Based on CFD," *Renewable Energy*, vol. 96, pp. 977-992, 2016.
- [5] Rusuminto, "Perancangan dan Optimasi Sistem Pembangkit Listrik Mikrohidro Dengan Daya 8,5 kW," *Jurnal Elemen*, vol. 1, no. 2, 2015.
- [6] A. Sidiq and Iskendar, "Perancangan dan Analisis Pemilihan Jenis Penggerak Mula Untuk Pembangkit Listrik Mikrohidro," *Jurnal Teknik Mesin UNISKA*, vol. 2, no. 1, pp. 49-51, 2016.