

DESAIN TURBIN TESLA SEBAGAI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR

Marfizal¹⁾, Dedi Wardianto^{2)*}, Sufiyanto³⁾, M.Yusuf⁴⁾

^{1),3),4)} Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Jambi

³⁾ Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Padang

*Correspondent Author Email: wardiantodedi71@gmail.com

Abstract

This research focuses on the design of the Tesla Turbine as a simple Hydroelectric Power Plant. This design focuses on the main dimensions of the Tesla Turbine such as diameter, distance, disk thickness and other supporting components. This Tesla turbine is designed for. Head 9.8 m and discharge 0.028 m³/s so that the disk dimensions are obtained: distance between disks (b)= 0.8 mm, disk diameter (D)=160 mm, disk thickness (t)=0.40 mm, aspect ratio (ϵ)=0 mm, Ri= 24 mm, number of disks (N)=13 disks. For Nozzle dimensions: Nozzle surface area (A_n)=0.002m², Nozzle diameter (D_n)=0.051m, Nozzle width (l_n) =16.4mm. For the turbine housing, the following dimensions are obtained: turbine housing width (l_h)=200mm, turbine housing height (h_h)=200mm, wall thickness (t_d)=8mm, turbine housing diameter (D_h)=166mm, turbine housing thickness (t_h)=40.26mm

Keywords: Design, Turbine, Tesla, Disk

Abstrak

Penelitian ini fokus pada desain Turbin Tesla Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air sederhana, desain ini fokus pada dimensi dimensi utama Turbin Tesla seperti diameter, jarak, ketebalan disk dan komponen pendukung lainnya. Turbin tesla ini didesain untuk. Head 9,8 m dan debit 0,028 m³/s sehingga di peroleh dimensi disk : jarak antar disk (b) = 0,8 mm, diameter disk (D) = 160 mm, tebal disk (t) = 0,40 mm, aspect ratio (ϵ) = 0 mm, R_i = 24 mm, jumlah disk (N) = 13 disk. Untuk dimensi Nozel: Luas permukaan nozel (A_n) = 0,002m², Diameter nozel (D_n) = 0,051 m, Lebar nozel (l_n) = 16,4mm. Untuk rumah turbin di peroleh dimensi sebagai berikut : lebar rumah turbin (l_h) = 200mm, tinggi rumah turbin (h_h) = 200mm, Tebal dinding (t_d) = 8mm, Diameter rumah turbin (D_h) = 166mm, tebal rumah turbin (t_h) = 40,26mm

Kata Kunci : Desain, Turbin, Tesla, Disk

1. PENDAHULUAN

Turbin tesla adalah suatu mesin yang mengubah energi fluida menjadi energi mekanik dengan menggunakan cakram yang disusun berlapis pada poros dengan jarak tertentu. Umumnya turbin Tesla menggunakan uap atau udara bertekanan sebagai fluida penggerakannya. Turbin ini dipatenkan oleh Nikola Tesla pada tahun 1913. Turbin Tesla juga dikenal sebagai turbin lapisan-batas, turbin tipe kohesi, dan turbin lapisan-Prandtl (setelah Ludwig Prandtl) karena menggunakan efek batas-lapisan dan bukan cairan yang menimpa bilah seperti pada turbin konvensional. Peneliti bioteknologi telah menyebutnya sebagai pompa sentrifugal multi-disk. Salah satu keinginan Tesla mengimplementasikan turbin ini adalah geotermal yang dideskripsikan dalam *Our Future Motive Power*. [1][2]

1.1. Ketebalan Disk (Disc Thickness)

Desain asli Tesla memiliki cakram dengan tepi yang meruncing, karena Tesla yakin hal ini akan meningkatkan efisiensi dengan mengurangi losis [3]. Kerugian terjadi pada ujungnya akibat cairan yang berusaha berpindah dari satu sisi dari piringan ke piringan lainnya, mirip dengan perilaku aliran

di sekitar ujung sayap pesawat terbang. Tesla mengimplementasikan ide ini dengan menggunakan cakram yang sangat tipis [4] [5], namun cakram tersebut melengkung karena tekanan yang dihasilkan pada RPM tinggi. Dengan keterbatasan pengetahuan material dan teknik pembuatannya, Tesla tidak mampu untuk menguji cakram yang cukup kuat untuk menahan tekanan tinggi.

Li et al., [6] memilih ketebalan cakram yang sangat kecil yaitu 0,5 mm untuk studi eksperimental. Li dkk., berpendapat bahwa *shock loss* terjadi ketika fluida kerja membentur tepi piringan. Oleh karena itu, Li dkk., berusaha mengurangi kerugian ini dengan meminimalkan ketebalan cakram. Oleh memilih ketebalan cakram kecil yang ditentukan, kerugian guncangan dapat diabaikan dengan aman. Secara umum, hanya sedikit penelitian yang membahas pengaruh ketebalan cakram. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengatasi ketebalan cakram yang sesuai untuk berbagai aplikasi turbin Tesla.

1.2. Jarak Antar Disk (*Disc Gap*)

Krishnan [7] menguji total 3 konfigurasi celah antar cakram - 125 μm , 250 μm , dan 500 μm dengan jumlah cakram dan profil keluar yang bervariasi di antara total 6 tumpukan rotor. Ukuran turbin keseluruhan dijaga tetap konstan. Peshlakai [8] mencoba tiga media kerja yang berbeda - udara, air dan uap, pada turbin yang sama desain untuk membandingkan kinerja fluida yang berbeda. Celah cakram sebesar 1,3 mm dipilih untuk turbin. Efisiensi rotor maksimum yang dilaporkan untuk udara dan air masing-masing adalah 95% dan 0,49%. Efisiensi uap tidak dihitung karena keluaran daya yang rendah,

1.3. Jumlah Disk (*Number of Discs*)

Romanin dkk., [9] menguji rotor dengan 8, 13, dan 20 cakram. Efisiensi meningkat secara signifikan ketika jumlah disc ditambah dari 8. Efisiensi yang diperoleh dengan 8 disc adalah antara 0 hingga 10%, sedangkan efisiensi dengan cakram 13 dan 20 kira-kira berada pada kisaran 10 hingga 20%, maksimal diperoleh dengan 13 disc. Hoya dan Guha [10] mengamati temuan serupa di penelitian lain belajar, dengan efisiensi meningkat dengan lebih banyak cakram. Tan et al., [11] berusaha mengoptimalkan jumlah disk dari karya sebelumnya [12] dengan menggunakan pendekatan dinamika fluida komputasi. Dengan mengurangi jumlah disc dari 21 menjadi 13, a pengurangan kehilangan kepala tercapai. Kehilangan head terjadi ketika fluida harus berputar 90° saat keluar dari celah disk ke stopkontak. Alirannya terpisah di sudut-sudut, dan terbatas pada wilayah vena kontrakta.

1.4. Diameter Disk (*Disc Diameter*)

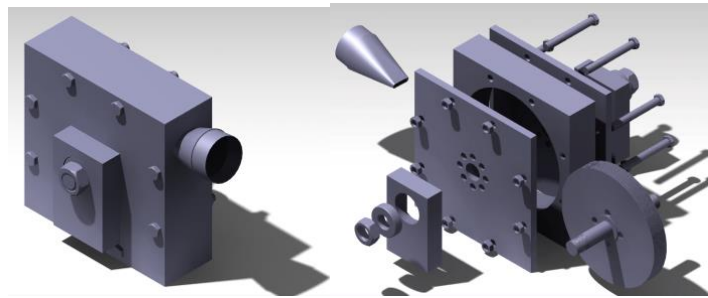
Lampart et al., [13] pertama kali melakukan analisis komputasi pada model cakram tunggal untuk mempelajari efek dari variasi diameter cakram dan jumlah saluran masuk nosel. Modelnya menggunakan area poros tengah sebagai pintu keluar dan tidak memiliki profil knalpot khusus seperti yang ditemukan pada turbin realistik. Sebanyak 6 model yang memiliki diameter rotor 100 mm dianalisis dengan jumlah nosel dan saluran masuk yang bervariasi sudut. Efisiensi maksimum yang diperoleh adalah 30% pada 18.000 RPM, yang tidak dapat bersaing dengan turbin konvensional. Lampart et al., [14] meningkatkan diameter menjadi 300 mm dalam upayanya meningkatkan efisiensi. Simulasi numerik dari rotor yang lebih besar dilakukan pada 9.000 RPM hanya. Perbaikan pada jalur perampangan terlihat. Efisiensi tertinggi dari studi baru ini adalah lebih besar dari 50%. Model ini memiliki dua nosel dengan sudut masuk 10°. Partikel cairan ditemukan untuk menjalankan 6 putaran sebelum keluar dari turbin.

1.5. Putaran Turbin (RPM)

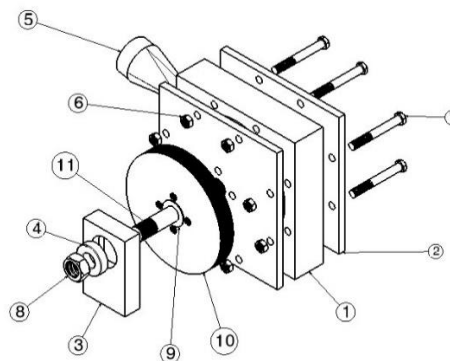
Krishnan [7], dari model komputasi, menyimpulkan bahwa RPM yang lebih tinggi menghasilkan lebih besar gaya sentrifugal dan jalur aliran yang lebih panjang. Efisiensi maksimal yang dicapai adalah 36,6%, namun Krishnan [7] menyatakan bahwa turbin mempunyai potensi mencapai efisiensi sebesar 40%. Lampart et al., [3] menganalisis model sederhana (seperti yang dijelaskan sebelumnya pada 9.000 dan 18.000 RPM. Menurut penelitian, kecepatan rotor mempengaruhi bentuk garis arus dan waktu yang dihabiskan oleh fluida di turbin. Jalur yang lebih panjang diinginkan karena akan meningkatkan perpindahan momentum, dan karenanya, efisiensi turbin. Simulasi numerik ditampilkan

2. METODOLOGI

Sebelum mendesain turbin tesla diperlukannya persamaan guna untuk menentukan bentuk dan desain turbin tesla. Tetapi terdapat juga hal-hal yang telah diketahui nilainya yaitu: Head (H), head merupakan tinggi air jatuh sebelum menyentuh turbin. Nilai head yang diketahui adalah $H = 9,8 m$. Rapat massa (ρ), rapat massa adalah suatu besaran turunan dalam fisika. Nilai rapat massa untuk fluida adalah (ρ) = $1000 kg/m^3$. Viskositas kinemati (ν), nilai viskositas kinematik dalam pembuatan turbin tesla ini adalah (ν) = $1,007 \times 10^{-5} m^2/s$. Diameter pipa (d), diameter pipa yang digunakan untuk mengalirkan air dari tedmon ke turbin adalah (d) = $2 inch = 0,05080 m$. Putaran turbin (n), Nilai dari putaran ini merupakan asumsi dalam pendesain. Adapun nilai dari putaran turbin ini adalah $n = 1500 Rpm$. Adapun turbin tesla yang akan di rancang seperti terlihat pada gambar 1 dan gambar 2 dibawah.



Gambar 1. Turbin Tesla



Gambar 2. Komponen – komponen Turbin Tesla

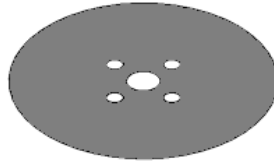
Keterangan gambar:

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1) Rumah turbin | 6) Rumah turbin |
| 2) Dinding rumah turbin | 7) Dinding rumah turbin |
| 3) Kedudukan bearing | 8) Kedudukan bearing |
| 4) Bearing | 9) Bearing |
| 5) Nozel | 10) Nozel |

Adapun tahap - tahapan yang dilakukan dalam mendesain turbin tesla sebagai berikut:

2.1 Desain Disk

Setelah menghitung dan mendapat kan hasil dari *fluida* maka selanjutnya adalah melakukan perhitungan *disk* guna mendapat nilai ukuran yang akan digunakan dalam mendesain *disk* turbin tesla. Piringan (*disk*) turbin pada turbin tesla merupakan piringan bulat yang disusun bertumpuk pada satu sumbu poros. Pada satu *disk* terdapat lubang sebagai *exhaust* untuk tempat keluarnya *fluida*. Adapun persamaan tersebut yaitu:



Gambar 3. Gambar *Disk*

2.2 Kecepatan Sudut

Kecepatan sudut adalah satuan besar sudut yang terjadi dalam satu putaran penuh. Persamaan yang digunakan untuk mengetahui nilai dari putaran sudut yang mana digunakan [5] [7]:

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} \quad (1)$$

Dimana : ω = Putaran sudut (Rad/s),
 n = Putaran (Rpm)

2.3 Jarak Antar Disk

Jarak antar *disk* adalah celah untuk membatasi antar *disk* 1 dengan *disk* yang lain, jarak antar *disk* ini berguna untuk lajunya aliran, adapun persamaannya [5] [7] adalah :

$$b = \pi \sqrt{\frac{v}{\omega}} \quad (2)$$

Dimana: b = Jarak Antar Disk (m),
 v = Viskositas kinematic (m^2/s)
 ω = Putaran sudut (Rad/s)

2.4 Jari Jari Luar Disk

Dengan mengetahui nilai jarak antar *disk*. Maka Jari – jari luar yang mana merupakan setengah lingkaran dari *disk* yang akan digunakan. Maka jari-jari *disk* dapat diketahui dengan persamaan yang mana digunakan juga oleh [5] [7]:

$$r_o = \frac{b}{0,01} \quad (3)$$

Dimana: r_o = Jari Jari Luar Disk (m)
 b = Jarak Antar Disk (m)

2.5 Diameter Disk

Dengan mengetahui ukuran dari jari-jari *disk* yang akan digunakan. Maka diameter *disk* dapat diketahui dengan persamaan [5] [7] sebagai berikut :

$$D = r_o . 2 \quad (4)$$

Dimana: D = Diameter disk (m)
 r_o = Jari Jari Luar Disk (m)

2.6 Aspect Ratio

Dengan diketahuinya nilai dari jarak *disk* dan jari-jari luar dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut [5] [7] :

$$\epsilon = \frac{b}{r_o} \quad (5)$$

Dimana: ϵ = Aspect ratio (m)

b = Jarak Antar *Disk* (m)
 r_o = Jari Jari Luar *Disk* (m)

2.7 Radius Ratio

Radius ratio adalah perbandingan antara radius luar dengan radius dalam disk. Menurut dari penelitian Damodhar R, dkk Radius Ratio yang digunakan adalah $0,3 < r_i/r_o < 0,4$ (5). Maka radius rasionya adalah [5] [7]:

$$\frac{r_i}{r_o} = \frac{3}{10} \quad (6)$$

$$r_i = \frac{3}{10} \times r_o$$

Dimana: r_i = Radius ratio (m)
 r_o = Jari Jari Luar *Disk* (m)

2.8 Tebal Disk

Dengan mengetahui nilai dari jarak *disk*. Maka tebal *disk* dapat diketahui dengan persamaan yang mana juga telah digunakan [5] [7]:

$$t = \frac{b}{2} \quad (7)$$

Dimana: t = Tebal *Disk* (m)
 b = Jarak Antar *Disk* (m)

2.9 Jarak Antar Disk (Gap)

Dengan tebal disk dan jarak antar disk telah diketahui nilainya. Maka gap yang mana merupakan jarak antar disk dengan dinding rumah turbin tesla (housing) maka gap dapat dihitung dengan persamaan berikut [5] [7]:

$$s = 20 \times (b + t) \quad (8)$$

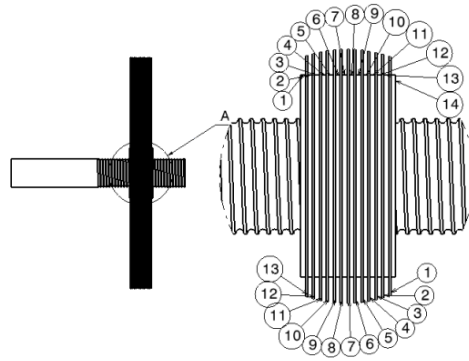
Dimana: s = Gap (m)
 b = Jarak Antar *Disk* (m)
 t = Tebal *Disk* (m)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Maka dengan diketahuinya parameter tetap di atas dapat diketahui data hasil perhitungan desain Turbin Tesla dengan persamaan yang telah disiapkan:

3.1 Jumlah Disk

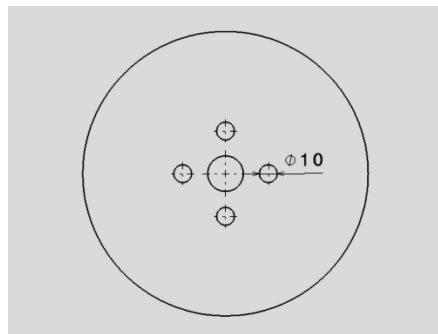
Jumlah disk (N) yang digunakan adalah berjumlah 13 buah. Ini mengacu dari penelitian [5] [7] diketahuinya jumlah disk maka jumlah celah yang digunakan adalah $N_{celah} = 13 + 1 = 14$ celah.



Gambar 4. Jumlah *Disk* Dan Jumlah Celah

3.2 Jumlah Lubang

Jumlah lubang *outlite* yang digunakan adalah 4 lubang. Nilai ini diketahui dari mengacu penelitian [5] [7]. diameter lubang penulis asumsikan 10mm.



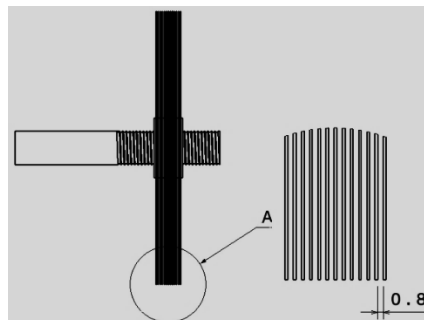
Gambar 5. Lubang Pada Disk

3.3 Putaran Sudut

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} \quad \omega = 2 \times 3,14 \times \frac{1500 \text{ Rpm}}{60 \text{ s}} \quad \omega = 6,28 \times \frac{1500 \text{ Rpm}}{60 \text{ s}} \quad \omega = 157 \text{ Rad/s}$$

3.4 Jarak Antar Disk

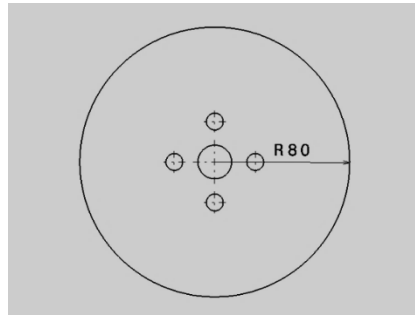
$$b = \pi \sqrt{\frac{v}{\omega}} \quad b = 3,14 \sqrt{\frac{1,007 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}{157 \text{ Rad/s}}} \quad b = 3,14 \times (2,53 \times 10^{-4} \text{ m}) \quad b = 0,0008 \text{ m} = 0,8 \text{ mm}$$



Gambar 6. Jarak Antar *Disk*

3.5 Jari Jari Luar Disk

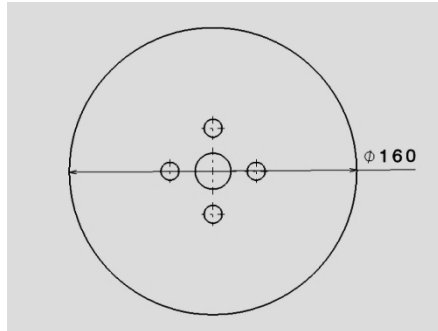
$$r_o = \frac{b}{0,01} \quad r_o = \frac{0,0008 \text{ m}}{0,01} \quad r_o = 0,08 \text{ m} = 80 \text{ mm}$$



Gambar 7. Jari-Jari Luar *Disk*

3.6 Diameter Disk

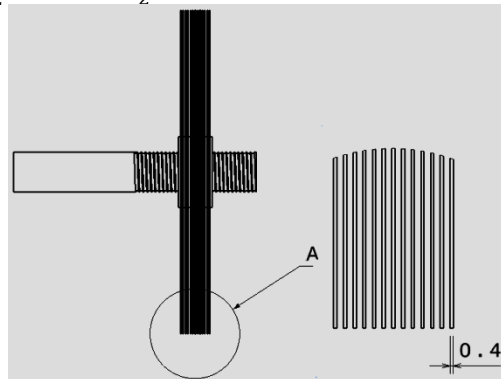
$$D = r_o \times 2 \quad D = 80 \text{ mm} \times 2 \quad D = 160 \text{ mm}$$



Gambar 8. Dimeter *Disk*

3.7 Tebal Disk

$$t = \frac{b}{2} \quad t = \frac{0,0008 \text{ m}}{2} \quad t = 0,0004 \text{ m} = 0,40 \text{ mm}$$



Gambar 9. Tebal *Disk*

3.8 Jarak Antar Disk (Gap)

$$s = 20 \times (b + t) \quad s = 20 \times (0,0008 \text{ m} + 0,0004 \text{ m}) \quad s = 0,024 \text{ m} = 23,86 \text{ mm}$$

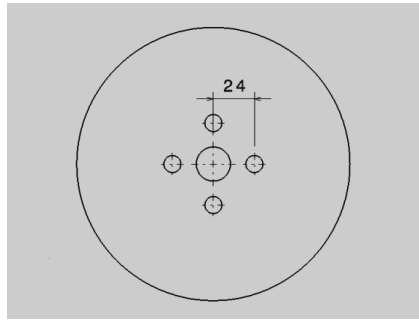
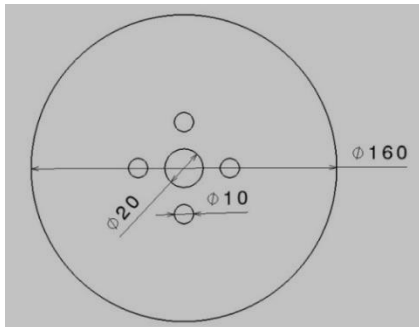
3.9 Aspect Ratio

$$\epsilon = \frac{b}{R_o} \quad \epsilon = \frac{0,0008 \text{ m}}{0,08 \text{ m}} \quad \epsilon = 0,01 \text{ m} = 10 \text{ mm}$$

3.10 Radius Ratio (ϵ_i):

Radius Ratio yang digunakan adalah $0,3 < R_i/R_o < 0,4$ maka:

$$\frac{R_i}{R_o} = \frac{3}{10} \quad R_i = \frac{3}{10} \times R_o \quad R_i = \frac{3}{10} \times 0,08 \text{ m} \quad R_i = 0,024 \text{ m} = 24 \text{ mm}$$

**Gambar 10.** Radius Ratio**Gambar 11.** Geometri Disk

3.11 Nozel

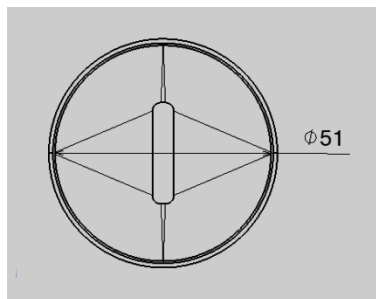
Adapun fungsi dari nozel adalah sebagai mengarahkan pancaran air ke sudu turbin. Dan mengubah tekanan menjadi energi kinetik. Serta mengatur kapasitas air yang masuk turbin, Adapun hal hal yang harus di desain [5] [7]:

3.11.1 Luas Permukaan Nozel

$$A_n = \frac{Q}{v} \quad A_n = \frac{0,028 \text{ m}^3/\text{s}}{13,87 \text{ m/s}} \quad A_n = 0,002 \text{ m}^2$$

3.11.2 Diameter Nozzle

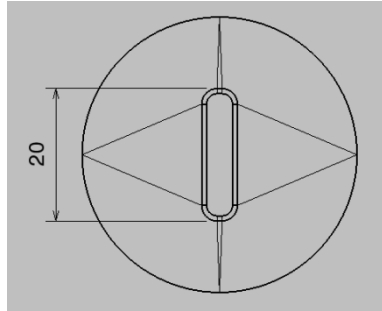
$$D_n = 0,54 \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{H}}} \quad D_n = 0,54 \sqrt{\frac{0,028 \text{ m}^3/\text{s}}{\sqrt{9,8 \text{ m}}}} \quad D_n = 0,051 \text{ m}$$

**Gambar 12.** Diameter Nozel

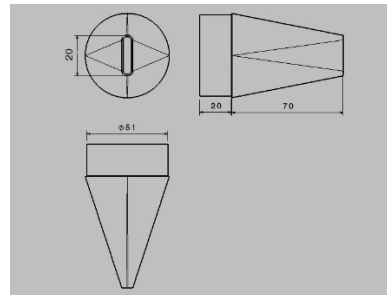
3.11.3 Lebar Pemancar Nozel

$$l_n = (t \times N) + (b \times N_{\text{celah}}). \quad l_n = (0,4 \text{ mm} \times 13) + (0,8 \text{ mm} \times 14) \quad l_n = 5,2 \text{ mm} + 11,2 \text{ mm}$$

$$l_n = 16,4mm = 20mm$$



Gambar 13. Lebar Pemancar Nozel

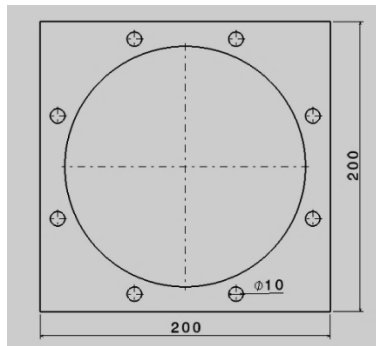


Gambar 14. Geometri Nozel

3.12 Rumah Turbin

3.12.1 Lebar dan Tinggi Rumah Turbin

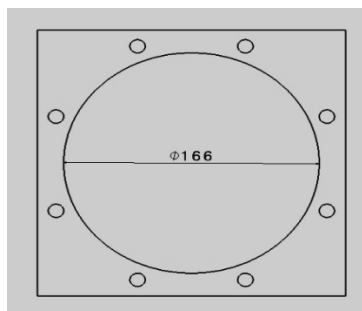
Pada desain rumah turbin pada jarak bebas antara rumah turbin dengan *disk* penulis asumsikan jarak bebas = 3mm, dan desain rumah turbin ini berbentuk persegi dengan lebar rumah turbin (l_h) = 200mm dan tinggi rumah turbin (h_h) = 200mm. Terdapat juga 8 lubang yang mana berdiameter 10 mm pada sisi rumah turbin yang berfungsi sebagai tempat baut pengunci rumah turbin.



Gambar 15. Lebar Dan Tinggi Rumah Turbin

3.12.2 Diameter Rumah Turbin

$$D_h = D + (\text{jarak bebas} \times 2) \quad D_h = 160mm + (3mm \times 2) \quad D_h = 160mm + 6mm \quad D_h = 166mm$$

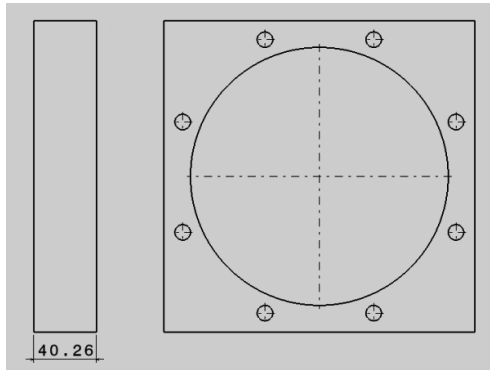


Gambar 16. Diameter Rumah Turbin

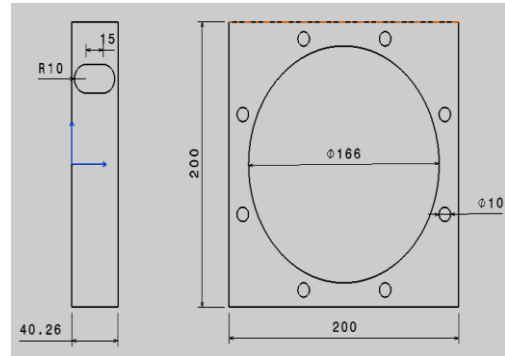
3.12.3 Tebal Rumah Turbin

$$t_h = (t \times N) + (b \times N_{\text{celah}}) + s. \quad t_h = (0,4mm \times 13) + (0,8mm \times 14) + 23,86mm$$

$$t_h = 5,2mm + 11,2mm + 23,86mm \quad t_h = 40,26mm$$



Gambar 17. Tebal Rumah Turbin



Gambar 18. Geometri Rumah Turbin



Gambar 19. Gmbar Jadi Turbin Tesla



Gambar 20. Gambar Terpasang Turbin Tesla

4. KESIMPULAN

Hasil desain diperoleh dimensi turbin tesla seperti dimensi disk : jarak antar disk (b) = 0,8 mm , diameter disk (D) = 160 mm, tebal disk (t) = 0,40 mm, *aspect ratio* (ϵ) = 0 mm , R_i = 24 mm, jumlah disk (N) = 13 disk. Untuk dimensi Nozel: Luas permukaan nozel (A_n) = 0,002m² , Diameter nozel (D_n) = 0,051 m , Lebar nozel (l_n) = 16,4mm. Untuk rumah turbin di peroleh dimensi sebagai berikut : lebar rumah turbin (l_h) = 200mm, tinggi rumah turbin (h_h) = 200mm, tebal dinding (t_d) = 8mm, diameter rumah turbin (D_h) = 166mm, tebal rumah turbin (t_h) = 40,26mm

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Miller, G. E.; Sidhu, A; Fink, R.; Etter, B. D. (1993). "July). Evaluation of a multiple disk centrifugal pump as an artificial ventricle". *Artificial Organs*. 17 (7): 590–592. doi:10.1111/j.1525-1594.1993.tb00599.x. PMID 8338431.
- [2] Miller, G. E.; Fink, R. (1999). "June). Analysis of optimal design configurations for a multiple disk centrifugal blood pump". *Artificial Organs*. 23 (6): 559–565. doi:10.1046/j.1525-1594.1999.06403.x. PMID 10392285.
- [3] Lampart, Piotr, and Łukasz Jędrzejewski. "Investigations of aerodynamics of Tesla bladeless microturbines." *Journal of Theoretical And Applied Mechanics* 49, no. 2 (2011): 477–499.
- [4] Warren, Rice. "Tesla Turbomachinery." In *Conference Proceedings of the IV International Tesla Symposium*. 1991.
- [5] Lawn, M. J., and Warren Rice. "Calculated design data for the multiple-disk turbine using incompressible fluid." *Journal of Fluids Engineering* 96, no. 3 (1974): 252-258.
- [6] Li, Ruixiong, Huanran Wang, Erren Yao, Meng Li, and Weigang Nan. "Experimental study on bladeless turbine using incompressible working medium." *Advances in Mechanical Engineering* 9, no. 1 (2017): 1–12.
- [7] Krishnan, Vedavalli Gomatam. "Design and Fabrication of cm-scale Tesla Turbines." PhD diss., UC Berkeley, 2015.

- [8] Peshlakai, Aaron Ron. "Challenging the versatility of the Tesla turbine: working fluid variations and turbine performance." Master's thesis, Arizona State University, 2012.
- [9] Romanin, Vince D., Vedavalli G. Krishnan, Van P. Carey, and Michel M. Maharbiz. "Experimental and Analytical study of sub-watt scale Tesla turbine performance." In ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, pp. 1005-1014. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2013.
- [10] Hoya, G P, and A Guha. "The design of a test rig and study of the performance and efficiency of a tesla disc turbine." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 223, no. 4 (2009): 451– 465.
- [11] Foo, S. J., W. C. Tan, and M. Shahril. "Development of tesla turbine for green energy application." In *Proceeding of National Conference in Mechanical Engineering Research and Postgraduate Studies (2nd NCMER 2010)*, pp. 671- 680. 2010.
- [12] Choon, Tan Wee, A. A. Rahman, Foo Shy Jer, and Lim Eng Aik. "Optimization of Tesla turbine using computational fluid dynamics approach." In *2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, pp. 477-480. IEEE, 2011.
- [13] Lampart, Piotr, Krzysztof Kosowski, Marian Piwowarski, and Łukasz Jędrzejewski. "Design analysis of Tesla micro-turbine operating on a low-boiling medium." *Polish Maritime Research* 16, no. Special (2009): 28-33.
- [14] Warren, Rice. "Tesla Turbomachinery." In *Conference Proceedings of the IV International Tesla Symposium*. 1991.