JURNAL TEKNIK ENERGI
Volume 13 Nomor 2 November 2024

Perancangan Turbin *Crossflow* Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Memanfaatkan Air Hasil Pendinginan Pada PLTP

Reyhan Dwi Saputra[1], Wahyu Budi Mursanto[2], Maridjo[3]
[1,2,3] *Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung*
[1]*reyhan.dwi.tptl20@polban.ac.id* [2]*wahyumursanto@gmail.com* [3]*maridjo@polban.ac.id*

Abstrak

Air umpan balik hasil pendinginan pada sistem Auxiliary Cooling Water System (ACWS) menuju basin cooling tower pada suatu PLTP memiliki potensi berupa debit dan head yang cocok untuk dibangunnya Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Perlu dilakukan pemilihan jenis serta perancangan dimensi turbin yang tepat untuk menghasilkan PLTMH yang efisien, selain itu perancangan komponen penunjang turbin juga harus diperhitungkan secara baik agar turbin air dapat berjalan optimal. Turbin air bekerja berdasarkan prinsip dasar hukum kekekalan momentum dimana air yang mengalir mengalami perubahan arah dan kecepatan dan menghasilkan gaya putar pada turbin. Energi potensial dan kinetik air kemudian digunakan untuk menggerakkan poros turbin yang akhirnya dapat menggerakkan generator melalui sistem transmisi seperti gearbox ataupun pulley. Debit yang tersedia pada air umpan balik ini sebesar 78,8 liter/sekon, tetapi debit desain atau debit yang dipakai hanya 88% dari debit yang tersedia atau 70 liter/sekon. Head gross yang dimiliki sebesar 5 meter dan dengan memperhitungkan rugi-rugi yang terjadi didapat head bersih setinggi 4,695 meter. Turbin air yang sesuai dengan potensi daya tersebut adalah turbin air crossflow. Turbin crossflow yang dirancang memiliki diameter luar dan lebar runner sebesar 0,2916 meter, diameter dalam runner 0,1944 meter, jumlah sudu sebanyak 18 sudu dengan kemiringan 60º dan jarak antar sudu sebesar 0,0512 meter. Poros yang ada pada turbin crossflow ini memiliki diameter 0,022 meter atau 22 mm dengan daya keluaran turbin atau daya poros mencapai 2,0967 kW.

Kata kunci: Turbin *crossflow*, *ACWS*, PLTMH, debit, *head*.

1. Pendahuluan

Pada sistem PLTP memiliki sistem pendinginan yang dinamakan *Closed Cooling Water System*. Sistem tersebut digunakan oleh kompresor, generator, dan lube oil agar tidak terjadi *overheat*. Air pada CCWS akan terjadi perpindahan panas karena mendinginkan komponen-komponen diatas. Berdasarkan alasan itulah terdapat *heat exchanger* guna mendinginkan air CCWS agar tetap berjalan sesuai dengan fungsinya. Air pendingin dari *heat exchanger* tersebut dipasok dari air basin *cooling tower* menggunakan *Auxiliary Cooling Water Pump* (ACWP). Sesudah mendinginkan air CCWS, air pendingin tersebut disirkulasikan kembali menuju basin *cooling tower*.

Waste water dari air pendingin hasil pendinginan tersebut memiliki potensi berupa head dan debit sebelum masuk kembali menuju basin *cooling tower*. Potensi itulah yang dimanfaatkan agar dapat membangkitkan listrik dalam skala kecil menggunakan turbin air. Turbin air adalah sebuah alat mekanik yang digunakan untuk mengubah energi potensial dan kinetik air menjadi energi mekanik. Turbin air bekerja dengan prinsip dasar bahwa aliran air yang mengenai sudu-sudu turbin akan membuat turbin berputar.

Berdasarkan peninjauan dan pengamatan langsung dilapangan, adanya potensi untuk pembuatan pembangkit listrik tenaga mikrohidro atau pada area tersebut. Sesuai dengan lokasi yang ditinjau, dimana lokasi tersebut memiliki *head gross* sebesar 5 meter dan debit sebesar 78,8 liter/detik maka turbin air yang cocok untuk membangkitkan listrik adalah jenis turbin air *crossflow*. Hasil perhitungan yang didapat lalu akan divisualisasikan menggunakan *software Solidwork.*

1.1 Auxiliary Cooling Water System (ACWS)

Sistem ini memiliki fungsi yaitu mengirimkan air sebagai air pendingin pada sistem *Closed Cooling Water System* (*CCWS).* Air pada sistem ini diambil dari basin *cooling tower* menggunakan *Auxiliary Cooling Water Pump*. Sistem *CCWS* ini memiliki *heat exchanger* untuk mendinginkan kembali air yang sudah menerima panas. Fluida pendingin yang dipakai pada HE tersebut diambil dari *Auxiliary Cooling Water System (ACWS)* melalui pompa yang disebut *Auxiliary Cooling Water Pump (ACWP).* Pompa ini mengambil air dari basin *cooling tower* lalu menuju ke HE *CCWS* kemudian kembali lagi menuju basin *cooling tower* setelah menjalankan tugasnya mendinginkan air pada sistem *CCWS.* Air umpan balik dari sistem ACW inilah yang dimanfaatkan untuk dibuatnya turbin air karena memiliki potensi berupa *head* dan debit yang cukup.

1.2 Pipa Pesat

Pipa pesat (*penstock*) berfungsi untuk menyalurkan dan mengarahkan air dari bak penenang atau baik air penampung ke turbin.
Diameter Pipa Pesat:

$$D = 0{,}72\ (Q^{0,5}) \quad (1.1)$$

Luas Penampang:

$$A = \frac{1}{4}\ \pi\ D^2 \quad (1.2)$$

Kecepatan Aliran Pipa:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (1.3)$$

Kedalaman Air Diatas Pipa:

$$s = 0{,}54\ x\ V\ x\ D^{0,5} \quad (1.4)$$

Panjang Pipa:

$$L_{pipa} = \sqrt{L\ horizontal^2 + Hgross^2} \quad (1.5)$$

Tebal Pipa:

$$Tebal\ pipa = D^3 \sqrt{\frac{n.Po}{2E}} \quad (1.6)$$

1.3 Bak Penampung Air

Bak penampung membantu dalam mengatur aliran air yang masuk ke *penstock* atau pipa pengalir menuju turbin.

Kedalaman Air Bak:

$$h = s + D + f \quad (1.7)$$

Panjang Bak:

$$B = 3\ x\ b \quad (1.8)$$

Panjang Bak:

$$L = 2\ x\ B \quad (1.9)$$

Luas Bak Penampung:

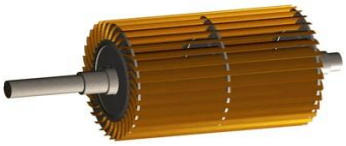
$$A = L\ x\ B \quad (1.10)$$

Volume Bak Penampung:

$$V = A\ x\ h \quad (1.11)$$

1.4 Turbin Crossflow

Turbin impuls ini sering dikenal dengan nama Turbin Michell-Banki yang merupakan penemu utamanya. Tinggi jatuh air (*Head*) yang dapat digunakan untuk menggerakkan turbin *Crossflow* pada kisaran diatas 1 m sampai dengan 200 m. Sedangkan untuk debit air yang digunakan untuk turbin *crossflow* yaitu antara 0,02 m^3/s sampai dengan 7 m^3/s. Efisiensi turbin *crossflow* sangat tergantung pada beberapa parameter desain yang meliputi diameter *runner*, panjang *runner*, kecepatan *runner*, daya turbin, ketebalan jet air, jarak bilah, jumlah bilah, radius lengkungan bilah, sudut serang, serta sudut bilah dan sudut keluar.



Gambar 1. Turbin *Crossflow*

Daya Hidrolis:

$$P = \rho \times g \times H \times Q \quad (1.12)$$

Daya Keluaran Turbin:

$$P_{out} = \rho\ x\ g\ x\ H \times Q \times \eta_t \quad (1.13)$$

Kecepatan Pancaran Air:

$$V_1 = C\ x\ (2gH)^{\frac{1}{2}} \quad (1.14)$$

Diameter Dalam Runner:

$$D_2 = \frac{2}{3}\ x\ D_1 \quad (1.15)$$

Kecepatan Putaran Turbin:

$$N = \frac{39{,}87\ x\ \sqrt{H}}{D_1} \quad (1.16)$$

Jarak Antar Sudu:

$$t_1 = 0{,}175\ x\ D_1 \quad (1.17)$$

Jumlah Sudu:

$$Z = \frac{\pi\ x\ D_1}{t_1} \quad (1.18)$$

Jari-jari Kelengkungan Sudu:

$$r_b = 0{,}326\ x\ r_1 \quad (1.19)$$

Torsi:

$$T = \frac{60\ x\ P}{2\ x\ \pi\ x\ n} \quad (1.20)$$

Diameter Poros:

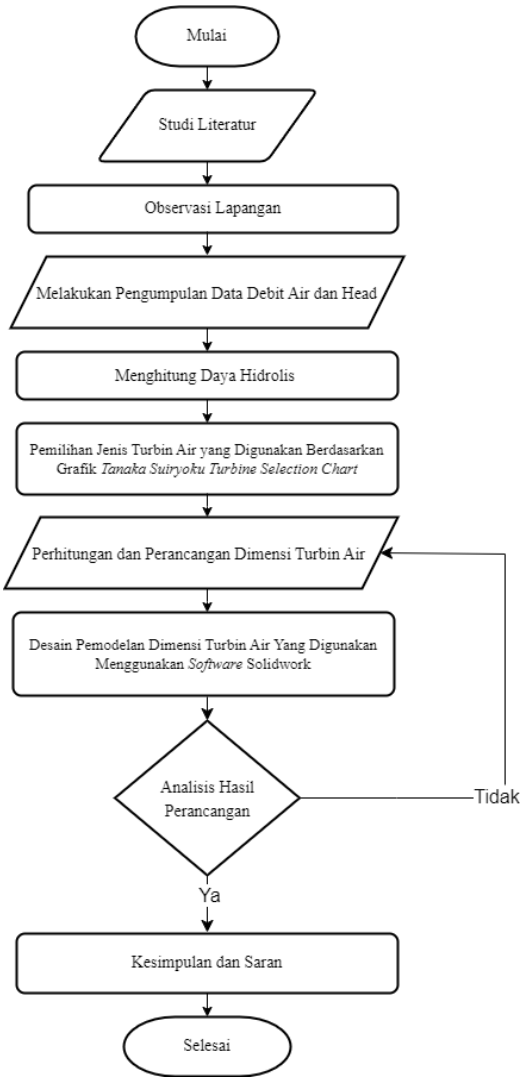
$$D_s = [\frac{5{,}1}{\tau_a}\ x\ K_t\ x\ C_b\ x\ T]^{1/3} \quad (1.21)$$

1.5 Pemilihan Pasak

Ukuran pasak yang digunakan pada poros untuk hubungan antara poros dan puli merujuk pada standar yang disajikan pada literatur khurmi dan gupta (2005) dan Sularso (1997).

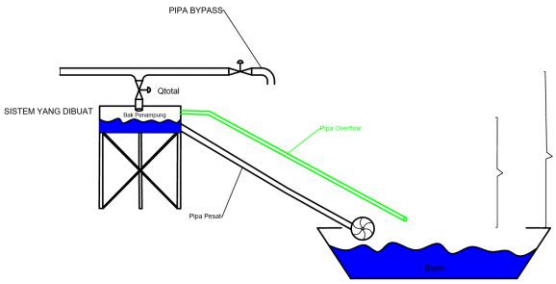
2. Metodologi

Proses penggalian informasi yang diperlukan untuk menyelesaikan perancangan turbin *crossflow* ini diuraikan dalam diagram alur yang disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Perancangan

Gambar 2 menunjukkan ilustrasi mengenai sistem PLTMH yang terdiri dari turbin *crossflow* dan komponen penunjangnya seperti bak penampung air serta pipa pesat.



Gambar 3. Ilustrasi sistem yang dibuat.

2.1. Data Perancangan

Debit dilakukan pengambilan data selama 5 hari dimulai tanggal 21 maret 2024 s/d 25 maret 2024. Sedangkan data *Head* dilakukan satu kali saja dengan mengukur melalui titik tertinggi air pada pipa umpan balik *Auixiliary Cooling Water System* (ACWS) sampai titik jatuh air pada basin cooling tower sehingga didapat berapa meter *head* yang ada pada lokasi tersebut. Didapat *head gross* sebesar 5 meter.

Tabel 1.
Data debit

No	Tanggal	Jam (WIB)	Q1 (L/s)	Q2 (L/s)	Q3 (L/s)	Qtotal (L/s)	Daya (Nett)
1	21/03/24	9.35	26	25	26	77	11,68
2	21/03/24	15.55	27	27	26	80	11,75
3	22/03/24	9.51	28	26	25	79	11,71
4	22/03/24	15.32	26	26	27	79	11,83
5	23/03/24	9.1	27	27	26	80	11,89
6	23/03/24	15.44	26	25	27	78	11,84
7	24/03/24	9.04	25	27	26	78	11,82
8	24/03/24	15.14	26	26	25	77	11,86
9	25/03/24	9.12	28	27	26	81	11,91
		Rata-rata				78,8	

Debit air yang didapat pada saat proses pengambilan data rata-ratanya sebesar 78,8 liter/sekon. Namun debit desain yang digunakan tidak seluruhnya atau 100% karena bertujuan untuk memastikan bahwa sistem pembangkit listrik dapat beroperasi secara kontinu dengan pasokan air yang konsisten. Oleh karena itu debit desain yang digunakan 88% dari debit rata-rata yaitu sebesar 70 liter/sekon.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Debit desain dan Head net

Debit desain yang digunakan tidak seluruhnya atau 100% karena didalam literatur disebutkan jika debit air diambil dari sungai dan menggunakan *Flow Duration Curve* (FDC) maka debit dengan probabilitas 70-80% sering dianggap sebagai titik optimum dalam PLTMH. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem pembangkit listrik dapat beroperasi secara kontinu dengan pasokan air yang konsisten.

Debit desain yang digunakan yaitu 88% dari debit yang tersedia atau sebesar 70 liter/sekon agar jika suatu saat debit air terjadi penurunan, turbin tetap terus bisa beroperasi. Debit desain diambil 88% dari debit yang tersedia agar jika suatu saat PLTP ini mengalami penurunan daya produksi dan *flow* air menjadi turun, turbin *crossflow* ini masih bisa tetap untuk beroperasi.

Nilai *head nett* yang didapat setelah memperhitungkan rugi-rugi yang terjadi pada pipa pesat adalah 4,695 meter. Hal ini sudah mempertimbangkan *losses minor* dan *mayor* yang terjadi pada pipa sesuai dengan material yang digunakan.

3.2. Pipa Pesat

Berdasarkan hasil perhitungan, parameter pipa pesat yang terbuat dari material baja disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3.
Hasil perencanaan pipa pesat

No	Pipa Pesat (*Penstock*)	
1	Diameter pipa pesat	190 mm
2	Luas penampang pipa pesat	0,0285 m^2
3	Kecepatan aliran dalam pipa	2,457 m/s
4	Kedalaman air diatas pipa pesat	0,579 m
5	Panjang pipa pesat	6,046 m
6	Tebal pipa pesat	0,3 mm

Pada Gambar 3. ditampilkan gambar 3D dari pipa pesat yang dibuat menggunakan *software solidwork*.

Gambar 3. Gambar 3D pipa pesat

3.3. Bak Penampung Air

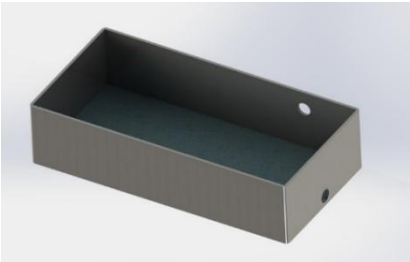
Bak penampung dirancang dengan bentuk persegi panjang menyesuaikan dengan lokasi dimana akan dipasangnya turbin *crossflow* ini. Konstruksi bak penampung harus tepat dengan volume air agar penggunaan pipa pesat dapat optimal sesuai dengan debit desain.

Berdasarkan hasil perhitungan, parameter bak penampung yang terbuat dari material beton disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4.
Hasil perencanaan bak

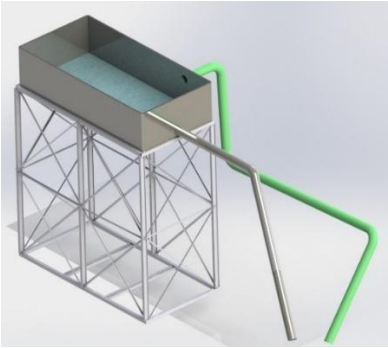
No	Bak Penampung Air	
1	Kedalaman bak penampung air	900 m
2	Lebar sebenarnya bak penampung	1,95 m
3	Panjang bak penampung air	3,9 m
4	Luas bak penampung air	7,605 m^2
5	Volume bak penampung air	6842 liter
6	Waktu bak penampung terisi penuh	87 sekon

Gambar bak penampung air yang dilakukan menggunakan *solidwork* sesuai dengan hasil perencanaan bak yang sudah dihitung. Pada gambar 4. juga ditampilkan gambar 3D dari bak penampung air yang dibuat.



Gambar 4. Gambar 3D bak penampung air

Setelah pipa pesat dan bak penampung air didesain selanjutnya adalah menggabungkan kedua komponen tersebut dengan baik. Penggabungan pipa pesat dan bak penampung air ini dilakukan menggunakan *solidwork* dan ditampilkan Gambar 5.



Gambar 5. Gambar pipa pesat dan bak penampung

Jika melihat pada Gambar 5. pipa berwarna hijau adalah pipa *overflow* yang berfungsi untuk mengalirkan kembali air ke dalam basin *cooling tower* jika air di dalam bak mencapai level yang terlalu tinggi. Fungsi lain dari pipa ini adalah mencegah tumpahan air dari bak.

3.4. Turbin Crossflow

Pada perencanaan turbin *crossflow* ini sudut masuk yang ditetapkan α_1 = 16º. Mackmore dan Merryfield (1949) menyatakan bahwa sudut masuk sudu α_1 yang ideal adalah 16º agar efisiensi maksimum tercapai sehingga menghasilkan sudut terkecil yang dapat dibuat yaitu β_1 = 29,84º. Menurut yang dijelaskan dalam literatur [4], disarankan agar perbandingan antara lebar roda jalan dan diameter luar *runner* turbin memiliki nilai sekitar 1 (L/D1 ≈

1), dimana penentuan dimensi ini didasarkan pada proporsi yang tepat dari turbin tersebut.

Sudu yang dirancang dalam turbin *crossflow* ini dilakukan dengan menggunakan segitiga kecepatan agar bentuknya sesuai dengan dimensi *runner* turbin. Hubungan antara segitiga kecepatan dan perancangan *runner* dan sudu turbin adalah bahwa segitiga kecepatan akan menghasilkan perancangan sudu dengan sudut dan bentuk *runner* yang optimal yang dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja keseluruhan turbin.

Hasil perhitungan untuk setiap dimensi turbin *crossflow* yang terbuat dari bahan ST 37 (*mild steel*) kemudian disajikan dalam format tabel seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.

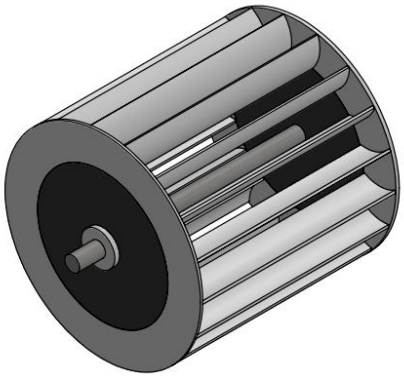
Ukuran pasak yang digunakan pada poros untuk

Tabel 5.
Hasil dimensi turbin *crossflow*

Dimensi Turbin *Crossflow*		
1	Daya hidrolis	3,224 kW
2	Daya keluaran turbin	2,0957 kW
3	Kecepatan pancaran air	9,406 m/s
4	Diameter luar (D_1) dan Lebar (L) *runner* turbin	291,6 mm
5	Diameter dalam *runner* turbin (D_2)	194,4 mm
6	Kecepatan putaran turbin	296,2 rpm
7	Ketebalan pancaran nosel (S_1)	25,52 mm
8	Jarak antar sudu (t_1)	51,29 mm
9	Jumlah sudu	18 sudu
10	Jari-jari kelengkungan sudu	23,769 mm
11	Sudut kelengkungan sudu	60º
12	Torsi perencanaan poros	103,987 Nm
13	Diameter poros (D_s)	22 mm

hubungan antara poros dan puli merujuk pada standar yang disajikan pada literatur khurmi dan gupta (2005) dan Sularso (1997).

Poros yang digunakan untuk turbin *crossflow* ini berjenis poros lurus yang memiliki diameter 22 mm dengan bahan material adalah baja khrom nikel mobliden SNCM 25. Kemudian setelah didapatkan besarnya diameter pada poros maka dilakukan pemilihan pasak berdasarkan tabel panduan pemilihan pasak poros. Didapat bahwa pasak yang cocok untuk diameter poros 22 mm adalah pasak dengan lebar penampang pasak 8 mm dan ketebalan pasak 7 mm.



Gambar 6. Gambar 3D Turbin crossflow

Perencanaan setiap bagian pada turbin *crossflow* dilakukan dengan pendekatan teoritis dari literatur yang sesuai. Perencanaan geometri dimensi turbin *crossflow* ini didasarkan pada penurunan perhitungan berdasarkan sifat-sifat geometri lingkaran, busur lingkaran, dan kedudukan segitiga dalam lingkaran sehingga mendapatkan bentuk sudu dan *runner* turbin yang tepat.

4. Simpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari seluruh proses perencanaan turbin *crossflow* adalah daya hidrolis yang didapat sebesar 3,224 kW serta daya keluaran turbin sebesar 2,0957 kW . *Head* bersih 4,965 m, debit desain air 0,07 m^3/s serta asumsi efisiensi 65% maka diperoleh dimensi turbin *crossflow* yang ditunjukkan melalui Tabel 5.

Perancangan turbin crossflow juga meliputi perencanaan komponen penunjangnya seperti bak penampung dan pipa pesat yang digunakan.

Proses perencanaan turbin *crossflow* dan komponen penunjang hanyalah menggunakan pendekatan studi analitis sehingga untuk mengetahui akurasi dan unjuk kerja sebenarnya perlu dilakukan verifikasi lebih lanjut secara mendalam baik melalui simulasi ataupun eksperimen.

Daftar Pustaka

[1] Arief, N. (2012). Turbin Mikrohidro Aliran Silang dengan Sudut Masuk 24 Derajat. Universitas Indonesia.

[2] B., A. N. (2014). Design Considerating Of Micro-Hidroelectric Power. *Energy Procedia 50 19-29*.

[3] Dietzel, F. (1988). *Turbin Pompa dan Kompresor*. (D. Sriyono, Trans.) Jakarta: Erlangga

[4] Balje, O. (1981). *Turbomachines : a guide to design, selection and theory*. New York: John Wiley.

[5] Dwi, M. d. (2020). *Turbin Impuls* (Cet. 1 ed.). Lampung, Indonesia: CV Ladunya.
[6] Harvey, A. (1993). *Micro-Hydro Design Manual*. London: IT Publications.
[7] IMIDAP. (2008). *Pedoman Teknis Standarisasi Peralatan dan Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro*. Jakarta: Dirjen Listrik dan Pemnafaatan Energi dan Sumber Daya Mineral.
[8] Khan, M. A. (2014). Design and Analysis of Cross Flow Turbine for Micro Hydro Power Application using Sewerage Water. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 8(7): 821-828.*
[9] Layman. (2004). *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*. Jerman: ESHA.
[10] Mantiri, H. E. (2018). Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Listrik Minihidro Sungai Moayat Desa Kobo Kecil Kota Kotamobagu. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer Vol. 7 no. 3, Juli-Oktober 2018, ISSN : 2301-8402.*
[11] Mockmore, C. &. (1949). The Banki Water Turbine. *Engineering Experiment Station Oregon State College. Bulettin Series No.25.*
[12] Nasir, B. A. (2013). Design of High Efficiency Cross-Flow Turbine for Hydro-Power Plant. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2(3).*
[13] Purga, A. K. (2019). Rancang bangun Turbin Aliran Silang (*Crossflow*) Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Di Sungai Desa Talang Mulya Kecamatan Padang Cermin Kabupaten Pesawaran.
[14] Patel, S. &. (2015). Study On Power Generation By Using Cross Flow Water Turbine In Micro Hydro Power Plant. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology.*