

Perencanaan Sistem Kelistrikan PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari

I P. E. April Yanto¹, I. A. D. Giriantari², W. G. Ariastina³

[Submission: 17-12-2020, Accepted: 18-01-2021]

Abstract — This paper introduces a redesign of Micro Hydro Power Plant (MHPP) in Banjar Dinas Mekar Sari, Panji Village, District of Sukasada, Buleleng Regency, Bali. The MHPP has been operated since 1980 by utilizing waterflow of Tukad Pasut River. Early investigation indicated that there is a reduced production capacity of the MHPP due to lack of maintenance. In addition, the initial design of the MHPP has not adopted the advanced power control systems, resulting in inefficient power production. The introduced design of the new MHPP utilizes a crossflow turbine to accommodate a waterflow rate of 1,32 m³/s and with an effective head of 16 m. The turbine mechanical energy is coupled to a generator by means of a belt coupling system, with a belt length of 3099 mm. The pulley diameter is 750 mm for the turbine side, and it is 149 mm for the generator side. The generator capacity is 185 kVA, 50 Hz, 230/400 V, 1500 rpm, and with an efficiency of 94%. The Electronic Load Controller has a capacity of 180 kW, with 6 ballast loads of 30 kW. The connection from the generator to the transformer uses the NYFGbY underground cable of 4 × 95 mm², with a length of 69 m. The transformer is a step-up and step-down type with a capacity of 250 kVA.

Keywords: MHPP, Renewable Energy, Electrical Systems.

Intisari — Artikel ini mengemukakan tentang desain ulang Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Banjar Dinas Mekar Sari, Desa Panji, Kecamatan Sukasada, Kabupaten Buleleng, Bali. PLTMH tersebut telah beroperasi sejak tahun 1980, dengan memanfaatkan aliran air Sungai Tukad Pasut. Investigasi awal menunjukkan adanya penurunan kapasitas produksi PLTMH karena kurangnya perawatan. Selain itu, desain awal PLTMH tersebut belum mengadopsi sistem kontrol yang modern, sehingga mengakibatkan produksi listrik yang tidak efisien. Rancangan baru untuk PLTMH di Banjar Dinas Mekar Sari menggunakan turbin *crossflow* untuk mengakomodasi laju aliran air 1,32 m³/detik dan dengan tinggi head efektif 16 m. Energi mekanik turbin dikopel ke generator melalui sistem kopel *belt* dengan panjang sabuk 3099 mm. Diameter *pulley* adalah 750 mm untuk sisi turbin, dan 149 mm untuk sisi generator. Kapasitas generator adalah 185 kVA, 50 Hz, 230/400 V, 1500 rpm, dan dengan efisiensi 94%. *Electronic Load Controller* memiliki kapasitas 180 kW, dengan 6 *ballast load* 30 kW. Sambungan dari generator ke transformator menggunakan kabel bawah tanah NYFGbY 4 × 95 mm², dengan panjang 69 m. Transformator berjenis *step-up/step-down* dengan kapasitas 250 kVA.

¹Mahasiswa, Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Udayana, Br. Dalem, Pejaten, Kediri, Tabanan (telp: 085739024292; e-mail: putu.eka486@gmail.com)

^{2, 3} Dosen, Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Udayana, Jln. Jalan Kampus Bukit Jimbaran 80361 INDONESIA (telp: 0361-703315; fax: 0361-4321; e-mail: dayu.giriantari@unud.ac.id, w.ariastina@unud.ac.id)

Kata Kunci : PLTMH, Energi terbarukan, Sistem Kelistrikan

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki sumber daya alam yang melimpah, termasuk juga sumber energi terbarukan. Potensi sumber energi terbarukan di Indonesia diantaranya adalah energi matahari, energi air, energi angin, biomassa, panas bumi, dan pasang surut air laut [1]. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah salah satu pembangkit listrik yang memanfaatkan energi terbarukan yaitu energi air. Potensi energi mini-mikro hidro berjumlah 19.385 MW di Indonesia. Pulau Bali memiliki potensi sebesar 30 MW [2].

PLTMH Jatiluwih adalah salah satu pembangkit listrik yang telah beroperasi di Bali. PLTMH Jatiluwih dibangun atas kerjasama Pemerintah Kota Toyama Jepang, Pemerintah Kabupaten Tabanan, dan Universitas Udayana [3]. Selain itu, terdapat pula PLTMH di aliran sungai Tiyang Tali, Buleleng yang perlu direvitalisasi agar dapat berfungsi dengan baik [4][5].

PLTMH lainnya yang terdapat di Bali adalah PLTMH yang dikelola oleh masyarakat Banjar Dinas Mekar Sari, Desa Panji, Kecamatan Sukasada, Kabupaten Buleleng. PLTMH tersebut memanfaatkan aliran Sungai Tukad Pasut sebagai PLTMH sejak tahun 1980. Pada tahun 2019, PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari mengalami penurunan unjuk kerja. Generator PLTMH yang berkapasitas 10 kW hanya dapat menghasilkan daya sebesar 200 W atau 2% dari kapasitasnya. Penurunan unjuk kerja ini disebabkan karena tidak adanya pemeliharaan secara berkala. Berdasarkan keterbatasan tersebut maka perlu dilakukan perencanaan kembali sistem kelistrikan PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari agar dapat beroperasi sesuai dengan potensi yang dimiliki. Sistem kelistrikan dirancang beroperasi secara *on-grid* dan komponen yang digunakan disesuaikan dengan komponen yang tersedia secara komersial.

II. KAJIAN PUSTAKA

PLTMH adalah pembangkit listrik skala kecil yang memanfaatkan tenaga air sebagai tenaga penggerak [6]. PLTMH pada dasarnya memanfaatkan energi potensial jatuhnya air (*head*) dan jumlah debit air. Pembangkit listrik tenaga air dengan kapasitas sampai 200 kW digolongkan kedalam PLTMH [7]. Komponen PLTMH terdiri dari komponen sipil, komponen mekanikal, dan komponen elektrik yang dapat diuraikan sebagai berikut [8]:

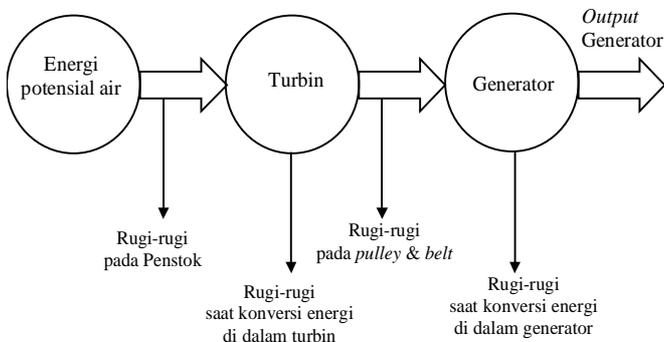
- 1 Bendungan Pengalih (*intake*), sebagai pengalih air dari sisi sungai menuju ke bak pengendapan.
- 2 Bak Pengendap (*settling basin*), tempat untuk mengendapkan sedimentasi yang ikut terbawa aliran air.



- 3 Saluran Pembawa (*headrace*), digunakan sebagai saluran untuk membawa air mengikuti kontur tanah.
- 4 Bak penenang (*forebay*), digunakan untuk meredam turbulensi air.
- 5 Pipa Pesat (*penstock*), digunakan untuk menjatuhkan air sehingga dapat memutar turbin.
- 6 Turbin, berfungsi untuk mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik.
- 7 Pipa Hisap, (*draft tube*), digunakan untuk menghisap air dan mengembalikan tekanan air.
- 8 Generator, digunakan untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik.
- 9 Sistem kontrol, berfungsi untuk menjaga *output* generator agar tetap stabil dan sebagai sistem pengaman.

A. Generator

Generator merupakan komponen yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Kapasitas generator yang digunakan PLTMH ditentukan berdasarkan potensi daya *input* pada sisi generator. Skema potensi daya PLTMH ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1: Skema Potensi Daya PLTMH

Potensi daya luaran PLTMH dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (1), (2), dan (3) [9]:

$$P_{\text{Teoritis}} = 9,81 \times \rho \times Q \times H_{\text{eff}} \quad (1)$$

$$P_{\text{Output Turbin}} = 9,81 \times \rho \times \eta_t \times Q \times H_{\text{eff}} \quad (2)$$

$$P_{\text{Output Generator}} = 9,81 \times \rho \times \eta_g \times \eta_t \times Q \times H_{\text{eff}} \quad (3)$$

dengan,

P = Daya yang dihasilkan (kW)

η_t = Efisiensi turbin (%)

η_g = Efisiensi generator (%)

ρ = Massa jenis air (kg/m^3)

Q = Debit air (m^3/s)

H_{eff} = Tinggi jatuh efektif (m)

B. Transmisi Mekanik

Transmisi mekanik digunakan untuk mentransmisikan daya dari turbin ke generator. Transmisi mekanik dapat dilakukan secara langsung dengan kopel apabila putaran turbin sama dengan putaran generator. Jika terdapat perbedaan putaran antara turbin dengan generator maka digunakan sistem transmisi tak langsung yaitu *pulley* dan *belt* [10]. Perbandingan diameter *pulley* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (4) [11]:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} \quad (4)$$

dengan,

n_1 = Putaran poros pertama (rpm)

n_2 = Putaran poros kedua (rpm)

d_1 = Diameter *pulley* penggerak (mm)

d_2 = Diameter *pulley* yang digerakkan (mm)

Belt adalah komponen yang digunakan untuk menghubungkan kedua buah *pulley* sehingga turbin dapat menggerakkan generator. Panjang *belt* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (5) [11]:

$$L = 2C + \frac{\pi}{2} (d_p + D_p) + \frac{1}{4C} (d_p + D_p)^2 \quad (5)$$

dengan,

L = Panjang keliling sabuk (mm)

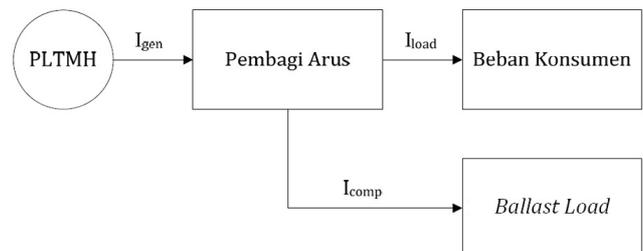
C = Jarak antara poros (mm)

d_p = Diameter *pulley* yang digerakkan (mm)

D_p = Diameter *pulley* penggerak (mm)

C. Electronic Load Controller (ELC)

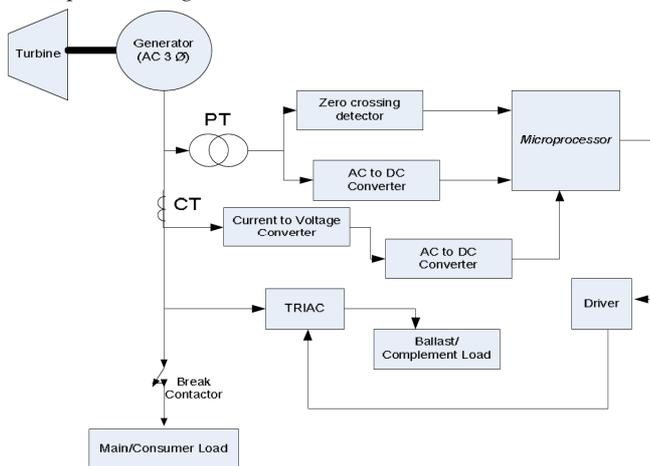
ELC adalah suatu sistem kontrol pada PLTMH yang berfungsi untuk menjaga frekuensi PLTMH tetap stabil [12]. Prinsip kerja *ELC* adalah dengan cara mengatur besar daya yang diserap agar bernilai sama dengan daya yang dihasilkan generator. *ELC* membagi arus PLTMH menuju beban konsumen dan *ballast load*, sehingga PLTMH akan tetap beroperasi pada keadaan nominal walaupun beban konsumen berubah-ubah. Skema prinsip kerja *ELC* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2: Prinsip Kerja *ELC* [12]

Metode yang dapat digunakan untuk mengatur jumlah daya yang disalurkan menuju *ballast load* adalah menggunakan beban kontinu dengan mengatur penyalanan sudut fasa pada penyulutan *thyristor* [13]. Diagram blok *ELC* dengan penyulutan *thyristor* ditunjukkan pada Gambar 3.

Tegangan sistem diturunkan dengan trafo *step down*, kemudian diteruskan ke rangkaian *Zero Crossing Detector* untuk diubah menjadi gelombang pulsa dan dikonversikan menjadi besaran tegangan DC yang sebanding dengan frekuensi sistem. Tegangan DC yang merupakan representasi dari frekuensi sistem, digunakan sebagai masukan mikroprosesor, sehingga apabila terjadi perubahan frekuensi sistem maka mikroprosesor akan menyulut *thyristor* dan *ballast load* sesuai dengan hasil ukur frekuensi *error*. Penyulutan *thyristor* dilakukan dengan mengatur sudut fasa (*phase angle control*) sampai frekuensi nominal tercapai [13].



Gambar 3: Diagram Blok ELC [13]

D. Pemakaian Sendiri

Energi listrik diperlukan PLTMH untuk kebutuhan operasional, sehingga jumlah beban yang akan digunakan PLTMH perlu diperhitungkan. Kebutuhan kelistrikan PLTMH meliputi penerangan dan beberapa kotak kontak. Perhitungan jumlah kotak kontak yang diperlukan berdasarkan pada jumlah peralatan dan besar daya dari peralatan tersebut. Sedangkan perhitungan jumlah titik lampu berdasarkan pada ukuran dan peruntukan ruangan yang akan digunakan. Jumlah titik lampu pada sebuah ruangan dapat dihitung dengan Persamaan (6) [14]:

$$n = \frac{E \times A}{\Theta_{\text{lampu}} \times \mu \times d} \quad (6)$$

dengan,

n = Jumlah titik lampu

E = Intensitas penerangan di bidang kerja (lux)

A = Luas ruangan (m^2)

Θ_{lampu} = Intensitas cahaya lampu (lumen)

μ = Efisiensi penerangan

d = Faktor depresiasi

E. Jaringan Tegangan Rendah

Jaringan tegangan rendah memiliki tiga jenis konstruksi, salah satu diantaranya adalah Saluran Kabel Tanah Tegangan Rendah. Penggunaan konstruksi Saluran Kabel Tanah Tegangan Rendah harus mempertimbangkan jarak aman dengan instalasi lain. Jarak persilangan kabel minimal 20 cm. Apabila jarak kurang dari itu, maka persilangan wajib dilindungi dengan plat beton atau pipa beton belah setebal 6 cm, minimal 50 cm dari titik silang [15].

Pada konstruksi Saluran Kabel Tanah Tegangan Rendah, kabel ditanam sedalam 70 cm dan diberi pasir urug setebal 20 cm dengan lebar galian sekurang-kurangnya 40 cm. Pada bagian atas pasir dipasang beton pengaman sebagai peringatan dengan tebal sekurang-kurangnya 6 cm dan pada bagian atas ditulis "Awas Kabel PLN Bertegangan" [15].

Jenis kabel yang digunakan pada jaringan ditentukan berdasarkan konstruksi jaringan yang digunakan dan besar

arus yang disalurkan [16]. Besar nilai arus yang disalurkan dapat dihitung dengan Persamaan (7) [17].

$$I_{\text{saluran}} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \quad (7)$$

dengan,

I = Arus nominal (A)

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan fasa-fasa (V)

Kemampuan hantar arus suatu penghantar ditentukan berdasarkan jenis dan luas penampang dari penghantar tersebut. Kemampuan hantar arus pada penghantar dapat dilihat melalui katalog spesifikasi penghantar yang digunakan.

F. Pemilihan Transformator

Pemilihan transformator daya pada pembangkit disesuaikan dengan kapasitas generator yang digunakan dan disarankan untuk menggunakan tipe pemasangan luar. Persentase pembebanan transformator agar terhindar dari *overload* adalah sebesar 80% dari kapasitasnya. Berdasarkan hal tersebut, maka kapasitas transformator dapat dihitung dengan Persamaan (8) [18].

$$S_{\text{trafo}} = \frac{S_{(kVA)}}{0,8} \quad (8)$$

dengan,

S_{trafo} = Kapasitas transformator (kVA)

$S_{(kVA)}$ = Daya maksimum generator/beban (kVA)

0,8 = Konstanta/batas aman penentuan *rating* transformator

III. METODE PENELITIAN

Perencanaan sistem kelistrikan PLTMH di Banjar Dinas Mekar Sari, Desa Panji, Kecamatan Sukasada, Kabupaten Buleleng dirancang beroperasi secara *on-grid*. Penelitian diawali dengan melakukan observasi secara langsung ke PLTMH yang berlokasi di Banjar Dinas Mekar Sari untuk mengetahui kondisi geografis di lingkungan penelitian. Data rancangan turbin dengan debit sebesar $1,32 \text{ m}^3/\text{s}$ dan tinggi jatuh air efektif sebesar 16 m, digunakan untuk mengetahui potensi daya pada sisi *input* generator.

Langkah selanjutnya dilakukan perhitungan potensi daya yang dapat dibangkitkan generator sehingga dapat ditentukan kapasitas generator yang akan digunakan serta daya *output* yang dihasilkan. Berdasarkan data rancangan turbin dan pemilihan generator maka dirancang ukuran *pulley* dan *belt* yang digunakan. Kapasitas ELC dan *ballast load* dihitung berdasarkan kapasitas generator. Konstruksi JTR dipilih berdasarkan pertimbangan kondisi jalur yang dilalui, sedangkan pemilihan kabel JTR dipilih berdasarkan arus yang disalurkan. Transformator dipilih berdasarkan kapasitas generator yang digunakan dengan mempertimbangkan faktor keamanan dari transformator. Komponen yang digunakan dalam perancangan diperoleh berdasarkan data komponen yang tersedia secara komersial dan mendekati hasil perhitungan.



IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Desa Panji terletak di Kecamatan Sukasada, Kabupaten Buleleng, Bali. Secara geografis Desa Panji berbatasan dengan Desa Ambengan di sebelah timur, Desa Wanagiri di sebelah selatan, Desa Panji Anom di sebelah barat, dan Desa Bhakti Segara di sebelah utara. Desa Panji memiliki luas wilayah sebesar 1061 hektar. Desa Panji terdiri dari delapan banjar dinas yaitu: Mekar Sari, Kembang Sari, Babakan, Bangah, Kelod Kauh, Dangin Pura, Dauh Pura, dan Mandul. Penduduk Desa Panji berjumlah 8.537 jiwa dengan 2.262 KK. Mata pencaharian penduduk Desa Panji diantaranya adalah petani, pedagang, pekebun, pengrajin, pegawai pemerintah, dan swasta [19]. Letak Desa Panji ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4: Lokasi Desa Panji [20]

Wilayah Desa Panji merupakan dataran tinggi yang memiliki aliran sungai, baik sungai alami maupun saluran irigasi. Salah satu aliran sungai yang sudah dimanfaatkan oleh masyarakat untuk PLTMH adalah aliran Sungai Tukad Pasut yang melintasi Banjar Dinas Mekar Sari, Desa Panji.

PLTMH yang terletak di Banjar Dinas Mekar Sari telah ada dan beroperasi sejak tahun 1980. Kondisi PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari sudah tidak dapat beroperasi secara maksimal. Generator yang dioperasikan pada PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari berkapasitas 10 kW. Namun, generator tersebut hanya menghasilkan daya sebesar 200 W atau 2% dari kapasitas Generator yang terpasang. Kondisi PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari ditunjukkan pada Gambar 5. PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari saat ini masih belum memiliki sistem kontrol. Listrik yang dihasilkan generator langsung digunakan untuk menyuplai beban lampu penerangan tanpa melalui sistem kontrol maupun sistem keamanan lainnya. Penurunan unjuk kerja dari PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari dipengaruhi oleh tidak adanya pemeliharaan komponen secara berkala.

A. Perancangan Turbin

Jenis turbin dipilih berdasarkan pada hasil pengukuran debit air dan tinggi jatuh air efektif (*head net*). Debit air Sungai Tukad Pasut adalah sebesar $1,32 \text{ m}^3/\text{s}$ sedangkan tinggi jatuh air efektif adalah sebesar 16 m, sehingga berdasarkan hal tersebut rancangan turbin PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari menggunakan jenis turbin *crossflow*. Potensi daya PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari secara teoritis adalah sebesar 207,187 kW. Dengan efisiensi turbin sebesar 89,5%, maka daya *output* turbin adalah sebesar 185 kW. Spesifikasi turbin *crossflow* PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari berdasarkan hasil analisis ditunjukkan pada Tabel 1.



(a) (b)
Gambar 5: Kondisi PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari
(a) *Penstock* dan Rumah Daya (b) *Pulley*, *Belt*, dan Generator

TABEL I
SPESIFIKASI TURBIN CROSSFLOW PLTMH BANJAR DINAS MEKAR SARI [20]

No	Indikator	Spesifikasi
1	Daya Turbin	185 kW
2	Putaran Turbin	298 rpm
3	Tinggi Jatuh Air	16 m
4	Debit aliran	$1,32 \text{ m}^3/\text{s}$
5	Posisi Poros	horizontal
6	Efisiensi Turbin	89,50%
7	Sudut Serang	16°
8	Torsi turbin	5962,46 Nm
9	Diameter Luar <i>Runner</i>	54 cm
10	Diameter dalam <i>Runner</i>	36 cm

B. Pemilihan Generator

Pemilihan kapasitas generator disesuaikan dengan potensi daya pada sisi *input* generator. Daya *output* rancangan turbin PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari adalah sebesar 185 kW. Daya yang dihasilkan pada turbin kemudian mengalami rugi-rugi kembali pada transmisi mekanik. Efisien pada transmisi mekanik adalah sebesar 95% [21], sehingga daya yang dapat dibangkitkan pada sisi *input* generator dapat dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_{\text{Input Generator}} &= P_{\text{Output Turbin}} \times \eta_{\text{Transmisi}} \\ &= 185 \text{ kW} \times 0,95 \\ &= 175,75 \text{ kW} \approx 176 \text{ kW} \end{aligned}$$

Kapasitas generator yang digunakan berdasarkan hasil perhitungan adalah sebesar 176 kVA. Dari hasil survei, generator yang tersedia secara komersial dan mendekati hasil perhitungan adalah Generator Sinkron 185 kVA, 50 Hz, 230/400 V, 1500 rpm, dengan efisiensi generator sebesar 94%.

Berdasarkan nilai efisiensi generator yang digunakan pada PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari maka dapat dihitung daya *output* generator yaitu:

$$\begin{aligned} S \text{ (kVA)} &= 176 \text{ kVA} \times 94 \% \\ &= 165,44 \text{ kVA} \end{aligned}$$

C. Perencanaan Pulley dan Belt

Rancangan turbin PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari memiliki selisih kecepatan putaran dengan generator yang digunakan, sehingga *pulley* dan *belt* digunakan sebagai transmisi mekanik untuk mentransmisikan daya. Berdasarkan hasil analisis, kecepatan putaran turbin PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari yang dirancang adalah sebesar 298 rpm [20].

Sedangkan kecepatan putaran generator yang digunakan adalah sebesar 1500 rpm. Diameter *pulley* berbanding terbalik dengan kecepatan putar *pulley*. Berdasarkan data tersebut, didapatkan perbandingan diameter *pulley* yang digunakan sebagai berikut :

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1}$$

$$\frac{298}{1500} = \frac{d_2}{d_1}$$

Berdasarkan perhitungan diatas, maka perbandingan antara diameter *pulley* turbin dengan *pulley* generator adalah 15 : 2,98. *Pulley* yang digunakan pada sisi turbin berdiameter 750 mm, sedangkan *pulley* yang digunakan pada sisi generator berdiameter 149 mm.

Panjang *belt* yang digunakan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut, dengan asumsi jarak antar poros sebesar 800 mm [11]. Asumsi jarak 800 mm digunakan agar ruang yang dibutuhkan untuk transmisi mekanis tidak luas.

$$L = 2C + \frac{\pi}{2} (d_p + D_p) + \frac{1}{4C} (d_p + D_p)^2$$

$$L = 2 \cdot (800) + \frac{3,14}{2} (149 + 750) + \frac{1}{4 \cdot (800)} (149 + 750)^2$$

$$L = 1600 + 1411,43 + 0,28$$

$$L = 3011,71 \text{ mm}$$

Ukuran *belt* yang tersedia secara komersial dan mendekati hasil perhitungan adalah *belt* dengan ukuran 3099 mm, sehingga jarak antar poros disesuaikan kembali. Penyesuaian dilakukan dengan perhitungan yang sama sebagai berikut.

$$L = 2C + \frac{\pi}{2} (d_p + D_p) + \frac{1}{4C} (d_p + D_p)^2$$

$$3099 = 2 \cdot C + \frac{3,14}{2} (149 + 750) + \frac{1}{4 \cdot (800)} (149 + 750)^2$$

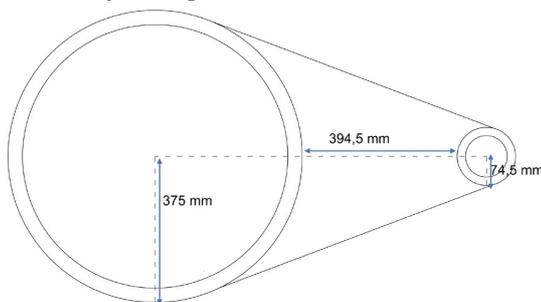
$$3099 = 2 \cdot C + 1411,43 + 0,28$$

$$3099 - 1411,43 - 0,28 = 2C$$

$$1687,29 = 2C$$

$$C = 1687,29/2 = 843,645 \text{ mm} \approx 844 \text{ mm}$$

Skema *pulley* dan *belt* pada PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6: Skema *Pulley* dan *Belt* PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari

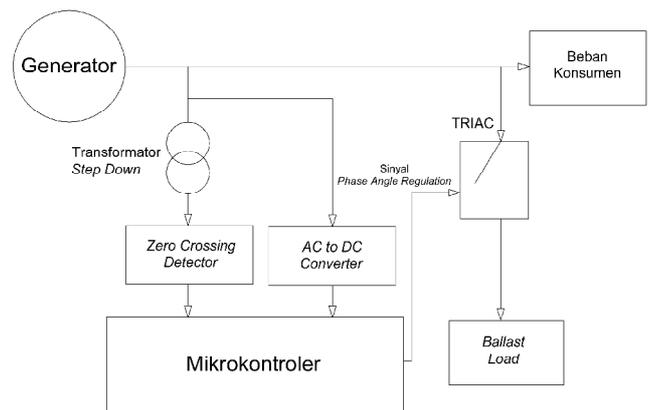
D. Sistem Kontrol Daya

Sistem kontrol yang digunakan pada perencanaan sistem kelistrikan PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari adalah *Electronic Load Controller (ELC)* karena *output* daya PLTMH lebih besar dari 5 kW. *ELC* juga digunakan karena

memiliki respon yang cepat terhadap perubahan beban serta tidak memerlukan governor.

ELC pada PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari dilengkapi dengan *ballast load*. Kapasitas *ballast load* yang digunakan akan disesuaikan dengan kapasitas daya generator. Hal ini bertujuan apabila sistem tidak dapat terhubung ke jaringan PLN maka daya dapat disalurkan menuju *ballast load* sebelum PLTMH berhenti dioperasikan [22].

Nilai faktor daya pada *ballast load* adalah 1, nilai ini berdasarkan pada komponen *ballast load* yang berupa pemanas air dengan sifat resistif. Berdasarkan hal tersebut maka kapasitas *ballast load* yang diperlukan adalah sebesar 185 kW, atau 61,6 kW pada masing-masing fasa agar dapat sebanding dengan kapasitas generator. Berdasarkan hasil survei komponen yang mendekati hasil perhitungan, variasi *ballast load* yang digunakan adalah 2 buah *water heater* dengan kapasitas 30 kW pada masing-masing fasa agar pengontrolan dapat dilakukan melalui dua tahap. Meskipun kapasitas *ballast load* terdapat perbedaan sebesar 5 kW, perbedaan tersebut tidak terlalu besar pengaruhnya terhadap sistem PLTMH karena daya *output* yang dihasilkan PLTMH hanya sebesar 165,44 kW. Skema *ELC-ballast load* ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7: Skema *ELC-ballast load*

E. Sistem Sinkronisasi

Sistem sinkronisasi merupakan pengontrol sekaligus protektor pembangkit untuk sistem interkoneksi dengan *grid*. Sistem sinkronisasi berfungsi untuk mensinkronkan frekuensi, tegangan, dan urutan fasa pembangkit dengan *grid*. Apabila frekuensi, tegangan dan urutan fasa sudah sama maka secara otomatis modul akan menghubungkan daya dari pembangkit ke jaringan.



F. Pemakaian Sendiri

PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari memerlukan daya listrik untuk kebutuhan operasional. Keperluan kelistrikan pada PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari yaitu berupa penerangan pada rumah daya dan beberapa kotak kontak untuk keperluan pemeliharaan yang dirincikan sebagai berikut :

1) Titik Lampu pada Rumah Daya

Jumlah titik lampu dihitung berdasarkan ukuran dan peruntukan ruangan yang akan digunakan. Ukuran rumah daya sebuah PLTMH disesuaikan agar komponen PLTMH baik turbin, generator maupun sistem kontrol dapat terakomodasi di dalamnya. Ukuran rumah daya yang digunakan pada PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari diasumsikan berukuran panjang 4 m, lebar 3 m dan tinggi 4 m. Berdasarkan pada jenis pekerjaan yang dilakukan pada PLTMH yang meliputi pengawasan dan pemeliharaan mekanikal-elektikal maka intensitas penerangan yang dibutuhkan sebesar 500 lux [23]. Dengan asumsi pengotoran sedang maka nilai faktor depresiasi adalah 0,8 dan efisiensi penerangan 0,42 [23]. Lampu yang akan digunakan adalah Lampu TL 2×36 W, 6700 lumen. Sehingga jumlah titik lampu yang dipasang adalah :

$$n = \frac{500 \times 12}{6700 \times 0,42 \times 0,8} = 2,6 \approx 3$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, jumlah lampu yang digunakan pada rumah daya adalah 3 buah TL 2×36 W dengan total daya 216 W. Kabel yang digunakan untuk instalasi lampu adalah NYY $2 \times 1,5$ mm². Selain penerangan pada rumah daya, penerangan di sekitarnya juga diperlukan, sehingga digunakan 2 buah lampu 24 W sebagai penerangan di halaman rumah daya.

2) Keperluan Kotak Kontak untuk Peralatan Pemeliharaan

Asumsi peralatan pemeliharaan yang akan digunakan pada PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari ditunjukkan pada Tabel 2.

TABEL II
ASUMSI PERALATAN PEMELIHARAAN

No	Peralatan	Daya
1	Bor Listrik	450 Watt
2	Mesin Las	450 Watt
3	Gerinda	500 Watt
Total		1400 Watt

Dengan asumsi bahwa peralatan untuk pemeliharaan tidak digunakan secara bersamaan maka dipasang kotak kontak sebanyak 2 buah. Kabel yang digunakan pada instalasi kotak kontak adalah NYY $3 \times 2,5$ mm².

Berdasarkan total keperluan daya yang dibutuhkan PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari untuk pemakaian sendiri maka ditetapkan besaran daya yang digunakan adalah sebesar 1300 VA. Saat PLTMH beroperasi, kebutuhan daya tersebut diperoleh dari *output* daya PLTMH. Sedangkan apabila PLTMH tidak beroperasi, maka daya akan diperoleh dari PLN dan terhitung pada kWh *Exim*.

G. kWh Meter

kWh meter digunakan untuk mengukur daya yang disalurkan PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari. kWh Meter 3 fasa - *Expor Impor (Exim)* digunakan pada PLTMH Banjar Dinas Sari dengan tujuan untuk mengantisipasi apabila terjadi

perkembangan kebutuhan kelistrikan pada PLTMH. Perkembangan yang dimaksud adalah pemanfaatan sendiri *output* PLTMH untuk kepentingan kelompok sehingga tidak diperlukan lagi penggantian komponen kWh meter.

H. Jaringan Tegangan Rendah

Pemilihan konstruksi JTR PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari yang digunakan diperoleh berdasarkan peninjauan jalur pemasangan JTR. Kondisi jalur lintas JTR PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari merupakan perkebunan sehingga tidak dapat memenuhi ruang bebas hambatan jika menggunakan konstruksi Saluran Udara Tegangan Rendah Kabel Pilin atau Saluran Udara Tegangan Rendah *Bare Conductor*. Berdasarkan kondisi tersebut, maka konstruksi yang digunakan pada JTR PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari adalah Saluran Kabel Tanah Tegangan Rendah.

Pemilihan jenis kabel untuk Saluran Kabel Tanah Tegangan Rendah mengacu pada jenis kabel yang digunakan oleh PLN yaitu *Low Voltage Cable (LVC)* berjenis NYFGbY [15] Sedangkan untuk penentuan ukuran kabel harus mempertimbangkan kemampuan hantar arus (KHA) [16].

Daya yang disalurkan menggunakan kabel adalah sebesar 165,44 kVA atau 165.440 VA, sehingga besaran arus yang disalurkan dapat dihitung sebagai berikut.

$$I_{\text{saluran}} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V}$$

$$I_{\text{saluran}} = \frac{165.440}{\sqrt{3} \times 400}$$

$$I_{\text{saluran}} = 238,79 \text{ A}$$

Berdasarkan besaran arus tersebut, maka ukuran kabel yang digunakan adalah NYFGbY 4×95 mm². Spesifikasi kabel NYFGbY 4×95 mm² ditunjukkan pada Tabel 3.

TABEL III
SPESIFIKASI STANDAR NYFGbY 4×95 MM² [24]

No	Indikator	Spesifikasi
1	Konduktor	Tembaga
2	Isolasi	PVC, Armor Datar Baja Galvanis, Berselubung PVC
3	Diameter Keseluruhan	44,7 mm
4	Berat Keseluruhan	5,186 kg/km
5	Resistansi Maksimal (AC) Pada Suhu 70°C	0.238 ohm/km
6	Tahanan Isolasi Minimal Pada Suhu 20°C	30 M.ohm.km
7	Induktansi	0,233 mH/km
8	Kemampuan Hantar Arus Maksimal Pada Suhu 30°C	245 A (di udara) dan 250 A (di tanah)
9	Arus Hubung Singkat Maksimal Pada Rentang 1 Detik	11.05 kA

Penentuan panjang kabel yang digunakan berdasarkan pada panjang garis elevasi. Garis elevasi dihitung berdasarkan panjang garis horizontal dan selisih TPL titik akhir dengan titik awal. Perhitungan menggunakan persamaan *pythagoras*. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan bahwa panjang jalur JTR adalah sepanjang 69 m. Gambar jalur JTR ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8: JTR dari Rumah Daya menuju Transformator

Berdasarkan panjang lintas JTR maka dapat dihitung kebutuhan pasir urug dan beton peringatan yang digunakan. Jumlah pasir urug yang digunakan berdasarkan pada perhitungan volume pasir dengan tebal 20 cm dan lebar 40 cm sepanjang 69 m. Berdasarkan perhitungan tersebut, didapatkan bahwa volume pasir urug yang dibutuhkan adalah sebesar 5,52 m³. Beton peringatan yang digunakan yaitu Beton *Cover-U Ditch* 40 dengan lebar 40 cm, panjang 60 cm, dan tebal 6 cm. Jumlah beton peringatan yang digunakan dihitung dengan cara membagi panjang jalur JTR dengan panjang Beton *Cover-U Ditch* 40. Berdasarkan perhitungan tersebut, maka dibutuhkan 115 buah Beton *Cover-U Ditch* 40.

I. Transformator

Transformator *Step-Up/Step-Down* berfungsi untuk menaikkan tegangan dari pembangkit untuk disalurkan menuju jaringan 20 kV PLN, begitu juga sebaliknya. Kapasitas transformator yang digunakan berdasarkan pada kapasitas generator PLTMH yaitu sebesar 185 kVA. Dengan mempertimbangkan faktor keamanan *rating* pembebanan transformator sebesar 80% maka kapasitas transformator yang digunakan dapat dihitung sebagai berikut:

$$S_{trafo} = \frac{P (kVA)}{0,8}$$

$$S_{trafo} = \frac{185 kVA}{0,8}$$

$$S_{trafo} = 231,25 kVA$$

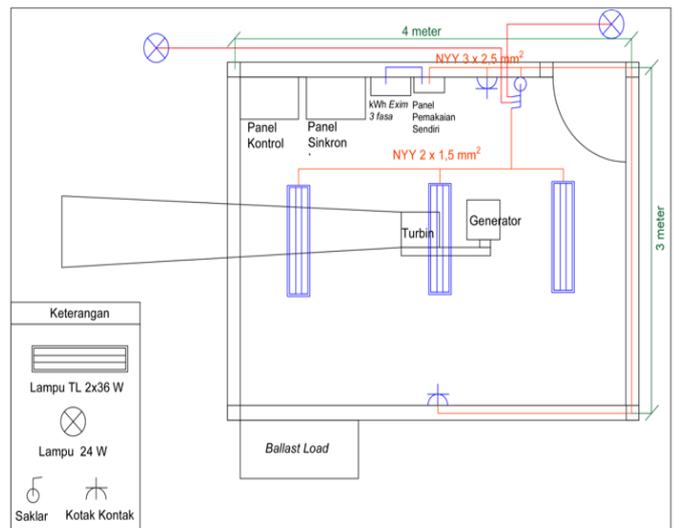
Berdasarkan hasil survei, transformator yang mendekati hasil perhitungan adalah transformator dengan kapasitas 250 kVA. Energi listrik yang telah dinaikkan tegangannya kemudian disalurkan ke JTM 20 kV Penyulang Panji yang berjarak 700 meter dari lokasi transformator.

J. Skema Rancangan

Secara keseluruhan, hasil rancangan sistem kelistrikan PLTMH di Banjar Mekar Sari dapat digambarkan dalam skema dan diagram seperti ditunjukkan pada Gambar 9 sampai dengan Gambar 11. Gambar 9 menunjukkan diagram segaris instalasi listrik pemakaian sendiri PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari, sedangkan Gambar 10 menunjukkan diagram sederhana perencanaan sistem kelistrikan PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari. Gambar 11 menunjukkan diagram segaris titik penyambungan PLTMH pada Penyulang Panji.

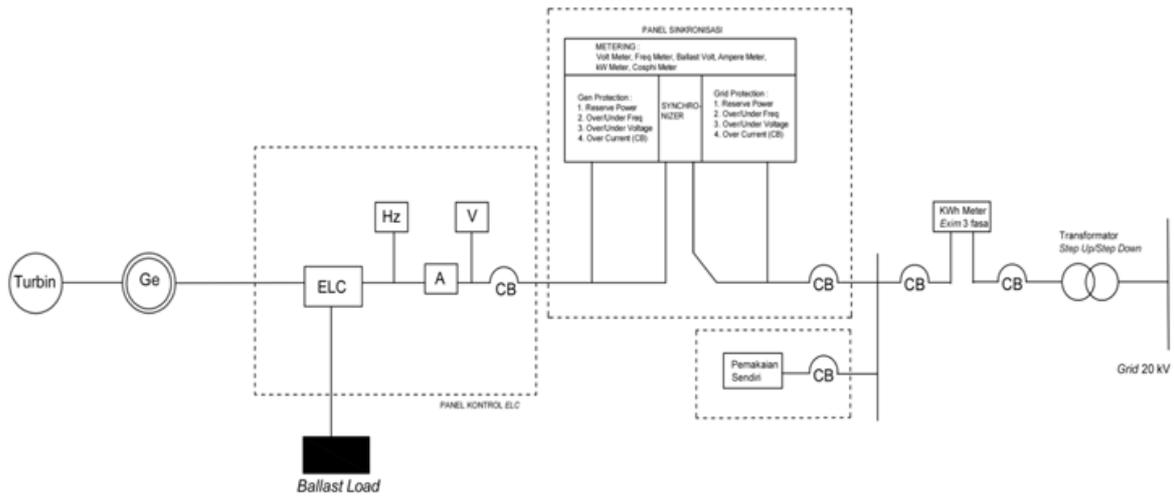
V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil rancangan sistem kelistrikan PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari, didapatkan kesimpulan bahwa daya listrik yang dibangkitkan PLTMH adalah sebesar 165,44 kVA. Generator yang digunakan berkapasitas 185 kVA dengan efisiensi 94%. *Electronic Load Controller* yang digunakan berkapasitas 180 kW, dengan 6 buah *ballast load* 30 kW. Sambungan dari generator ke transformator menggunakan kabel bawah tanah NYFGbY 4 × 95 mm², dengan panjang 69 m. Transformator yang digunakan berjenis *step-up/step-down* dengan kapasitas 250 kVA. Energi listrik yang dihasilkan PLTMH disalurkan pada jaringan tegangan menengah Penyulang Panji dengan titik sambung di SK064.

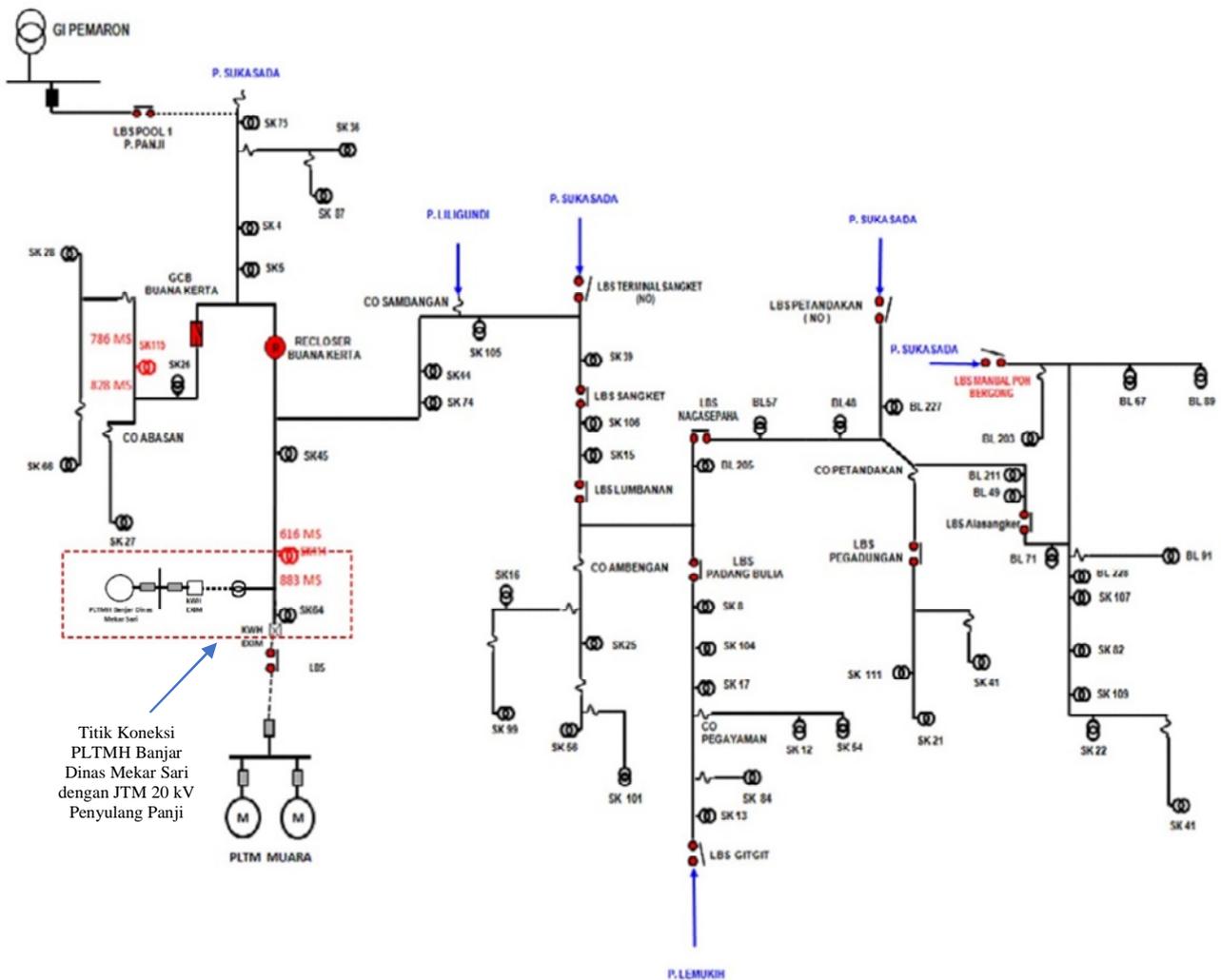


Gambar 9: Diagram Segaris Instalasi Listrik Pemakaian Sendiri PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari





Gambar 10: Diagram Segaris Perencanaan Sistem Kelistrikan PLTMH Banjar Dinas Mekar Sari



Gambar 11: Diagram Segaris Penyulang Panji [25]

REFERENSI

- [1] Vries, P.d, dkk. 2010. *Buku Panduan Energi yang Terbarukan*. Jakarta: Kementerian Dalam Negeri.
- [2] PT PLN (Persero). 2019. *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPPL) Tahun 2019-2028*. Jakarta: PT PLN (Persero).
- [3] Sari, P. D. dan Kumara, I. N. S. 2018. The Development of Jatiluwih Micro-Hydro Power Plants To Support Tourism Destinations. *ISCECE*. 9-14.
- [4] Suparyawan, D.P.D, Kumara, I.N.S, Ariastina, W.G. 2013. Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Desa Sambangan Kabupaten Buleleng Bali. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*. 12(2): 1-8.
- [5] Kumara, D. P. D. Suparyawan, W. G. Ariastina, W. Sukerayasa and I. A. D. Giriantari, "Microhydro powerplant for rural area in Bali to generate green and sustainable electricity," 2014 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS), Kuta, 2014, pp. 113-117, doi: 10.1109/ICSGTEIS.2014.7038741.
- [6] Gunawan, A., Oktafeni, A., Khabzali, W. 2013. Pemantauan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). *Jurnal rekayasa elektrika*. 10 (4): 20.
- [7] Sugiyono, A. 2009. Pemberdayaan Masyarakat dalam Mengelola Potensi Sumber Daya Air melalui Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mini/Mikro Hidro. *JESP*. 1(3): 121-128.
- [8] Kjölle, A. 2001. *Hydropower in Norway, Mechanical Equipment*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- [9] Arismunandar, A. 1991. *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik I*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- [10] Kurniawan, A dkk. 2009. *Pedoman Studi Kelayakan Mekanikal Elektrikal*. Jakarta: Dirjen ESDM.
- [11] Prayuda, D.A. 2014. "Perencanaan Transmisi Sabuk V dan Pulley Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro" (*skripsi*). Jember: Universitas Jember.
- [12] Saragih, A.M.S. 2017. "Studi Pemodelan Electronic Load Controller sebagai Alat Pengatur Beban Pembangkit Listrik Tenaga Mikro-Hidro" (*skripsi*). Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- [13] Slamet. 2012. Pengendali Beban Elektronik Tiga Fasa Menggunakan Mikro Kontroler Pada Pembangkit Listrik Mikro Hidro (PLTMH). *Ketenagalistrikan Dan Energi Terbarukan*. 11(1): 67-80.
- [14] Partha, C. G. I. 2014. *Dasar Instalasi Listrik*. Denpasar: Universitas Udayana.
- [15] PT. PLN (Persero). 2010. *Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Rendah Tenaga Listrik*. Jakarta: PT. PLN Persero
- [16] Kusdiana, D dkk. 2008. *Pedoman Teknis Standarisasi Peralatan dan Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)*. Jakarta: Dirjen ESDM.
- [17] Pabla, A.S. dan Hadi, A. 1994. *Sistem Distribusi Daya Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- [18] Sampeallo, A., S. 2012. Penentuan Kapasitas Transformator Daya Pada Perencanaan Gardu Induk (GI) Sistem 70 kV (Studi Kasus Pembangunan Gardu Induk Ende - Ropa – Maumere). *Seminar Nasional Sains dan Teknik 2012 (SAINSTEK 2012)*
- [19] BPS Kab Buleleng. 2017. *Kecamatan Sukasada dalam Angka 2017*. <https://bulelengkab.bps.go.id/publication/2017/09/20/547295c3d3d75cd3541434ad/kecamatan-sukasada-dalam-angka-2017.html>. Diakses tanggal 9 Juli 2020.
- [20] LAKSANA, Dewa Putu Ari; GIRIANTARI, Ida Ayu Dwi; SATYA KUMARA, I Nyoman. Redesain Turbin 175 KW Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Desa Mekar Sari Buleleng Bali. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, [S.l.], v. 19, n. 2, p. 241-248.
- [21] Nugroho, D., Suprajitno, A., Gunawan. 2017. Desain Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Air Terjun Kedung Kayang. *Jurnal Rekayasa Elektrika*. 13(3): 161-171.
- [22] Asri. 2014. Kapasitas Daya Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Alue Dua Aceh Utara. *Jurnal Rekayasa Elektrika*. 11(2): 54-61.
- [23] Harten, P.V. dan Setiawan, Ir. E. 1986. *Instalasi Listrik Arus Kuat 2*. Jakarta: Bina Cipta Bandung.
- [24] PT. Sutrakabel Intimandiri. 2010. *Sutrado Kabel Product Catalogue*. Bogor: PT. Sutrakabel Intimandiri.
- [25] PT. PLN (Persero) Distribusi Bali Area Bali Utara. 2019. *Single Line Diagram Penyulang Panji*. Buleleng: PT. PLN (Persero).

I P. E. April Yanto: Perencanaan Sistem Kelistrikan Pembangkit ...

p-ISSN:1693 – 2951; e-ISSN: 2503-2372



{ Halaman ini sengaja dikosongkan }