RANCANG BANGUN GENERATOR LISTRIK BERBASIS MICRO HYDRO SEBAGAI SUPPLY ENERGI ALTERNATIF PADA POS PERBATASAN PERSONEL TNI AD

Handika Danang Wijayanto[1)] Harnyoto[2)] Dermawan Rizki[3)]
[1) 2)]Politeknik Angkatan Darat , Batu Jawa Timur Indonesia
[3)]Institut Teknologi Nasional, Malang Jawa Timur Indonesia
Email korespondensi handikadanang24@gmail.com

ABSTRAK

Ketersediaan energi listrik menjadi salah satu kebutuhan penting dalam mendukung operasional pos perbatasan personel TNI AD, khususnya pada wilayah yang belum memiliki akses listrik stabil. Ketergantungan terhadap generator berbahan bakar fosil masih memiliki keterbatasan berupa kebutuhan distribusi bahan bakar, biaya operasional, dan kontinuitas suplai energi. Salah satu alternatif yang dapat dikembangkan adalah pemanfaatan pembangkit listrik tenaga *micro hydro* dengan memanfaatkan energi aliran air sebagai sumber energi terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis performa generator listrik berbasis *micro hydro* melalui karakterisasi internal generator, pengujian tanpa beban (*no-load test*), pengujian berbeban (*on-load test*), serta analisis performa elektrikal generator. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan rancang bangun (*research and development*). Generator yang digunakan merupakan generator magnet permanen tiga fasa hasil modifikasi dengan konfigurasi sambungan bintang (Y) dan sistem transmisi pulley sebagai pengatur putaran generator. Parameter penelitian meliputi putaran generator, tegangan keluaran AC dan DC, arus, daya listrik, frekuensi, resistansi kumparan, *voltage drop*, dan *copper losses*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan rasio pulley mempengaruhi performa generator, di mana peningkatan putaran generator cenderung meningkatkan tegangan keluaran dan frekuensi listrik. Pada kondisi berbeban, generator masih mampu menghasilkan daya listrik untuk menyuplai sistem pembebanan DC. Analisis resistansi kumparan, *voltage drop*, dan *copper losses* menunjukkan adanya pengaruh karakteristik internal generator terhadap performa elektrikal sistem. Penelitian ini menunjukkan bahwa generator listrik berbasis *micro hydro* berpotensi digunakan sebagai supply energi alternatif skala kecil pada wilayah perbatasan.

Keyword : micro hydro, generator magnet permanen, pulley, performa elektrikal, energi alternatif

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik merupakan salah satu faktor penting dalam mendukung operasional dan keberlangsungan aktivitas pada wilayah terpencil, termasuk pos perbatasan personel TNI AD. Ketersediaan energi listrik dibutuhkan untuk mendukung sistem komunikasi, penerangan, pengoperasian perangkat elektronik, serta menunjang kesiapsiagaan personel dalam pelaksanaan tugas pengamanan wilayah perbatasan. Namun demikian, tidak seluruh wilayah perbatasan memiliki akses jaringan listrik yang stabil sehingga diperlukan alternatif sumber energi mandiri yang mampu beroperasi secara berkelanjutan. Kondisi tersebut menyebabkan pemanfaatan energi terbarukan menjadi salah satu alternatif yang perlu dikembangkan untuk mendukung kebutuhan energi di wilayah terpencil.

Pada kondisi tertentu, kebutuhan energi listrik di wilayah perbatasan masih mengandalkan generator berbahan bakar fosil seperti *genset*. Penggunaan sistem tersebut memiliki beberapa keterbatasan, antara lain ketergantungan terhadap distribusi bahan bakar, biaya operasional yang relatif tinggi, serta keterbatasan kontinuitas suplai energi apabila terjadi hambatan logistik. Oleh karena itu, diperlukan sumber energi alternatif yang dapat dimanfaatkan secara lokal, berkelanjutan, serta sesuai dengan kondisi geografis wilayah perbatasan. Salah satu sumber energi alternatif yang berpotensi dikembangkan adalah pembangkit listrik tenaga *micro hydro* yang memanfaatkan energi aliran air menjadi energi mekanik melalui turbin dan dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator.

Pada sistem pembangkit berbasis *micro hydro*, generator menjadi komponen utama karena berfungsi mengubah energi mekanik hasil putaran turbin menjadi energi listrik. Performa generator dipengaruhi oleh berbagai parameter, antara lain kecepatan putar (*RPM*), konfigurasi transmisi, karakteristik kumparan, tegangan keluaran, arus, frekuensi, serta kemampuan generator mempertahankan performa pada kondisi berbeban. Oleh karena itu, analisis performa elektrikal generator diperlukan untuk mengetahui karakteristik kerja generator dan kemampuan sistem dalam menghasilkan energi listrik yang stabil pada kondisi operasi tertentu.

Berdasarkan penelitian terdahulu, pengembangan sistem *micro hydro* dan generator

magnet permanen telah banyak dilakukan, terutama pada sistem pembangkit skala kecil dengan kondisi *low head*. Akan tetapi, penelitian yang secara khusus membahas karakterisasi performa elektrikal generator berbasis *micro hydro*, meliputi hubungan putaran generator terhadap tegangan keluaran, frekuensi, resistansi kumparan, *voltage drop*, dan *copper losses* pada sistem pembebanan DC masih relatif terbatas. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kebutuhan penelitian lanjutan untuk mengetahui karakteristik kerja generator secara lebih spesifik sebagai dasar pengembangan sistem energi alternatif skala kecil yang lebih efektif dan aplikatif.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini difokuskan pada rancang bangun dan pengujian performa generator listrik berbasis *micro hydro* sebagai supply energi alternatif pada pos perbatasan personel TNI AD melalui pendekatan karakterisasi internal generator, pengujian tanpa beban (*no-load test*), pengujian berbeban (*on-load test*), serta analisis performa elektrikal generator. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem energi alternatif berbasis *micro hydro* yang mandiri, aplikatif, dan berpotensi mendukung kebutuhan operasional di wilayah perbatasan.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 PLTMH

Pembangkit listrik tenaga *micro hydro* merupakan sistem pembangkit listrik skala kecil yang memanfaatkan energi potensial dan kinetik aliran air menjadi energi listrik. Prinsip kerja sistem ini adalah mengubah energi air menjadi energi mekanik melalui turbin, kemudian energi mekanik tersebut dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator. Komponen utama sistem *micro hydro* terdiri atas sumber air, turbin, sistem transmisi, generator, sistem penyearah, dan beban listrik. Teknologi ini sesuai diterapkan pada wilayah terpencil yang memiliki potensi aliran air berkelanjutan, termasuk daerah perbatasan yang belum memperoleh suplai listrik stabil. Keunggulan sistem *micro hydro* meliputi sumber energi terbarukan, biaya operasional relatif rendah, serta kemampuan bekerja secara kontinu selama debit air tersedia.

Pada kondisi *low head*, pemilihan turbin dan generator menjadi faktor penting karena sistem harus mampu menghasilkan putaran yang cukup untuk menghasilkan energi listrik. Dalam penelitian ini, sistem *micro hydro* digunakan sebagai sumber energi mekanik untuk memutar generator magnet permanen melalui sistem transmisi pulley sehingga menghasilkan energi listrik sebagai supply energi alternatif skala kecil pada pos perbatasan personel TNI AD.

2.2 Turbin Kaplan *Fixed Pitch*

Turbin Kaplan merupakan turbin reaksi yang umum digunakan pada pembangkit listrik tenaga air dengan kondisi *head* rendah dan debit air relatif besar. Turbin ini bekerja dengan mengubah energi kinetik aliran air menjadi energi mekanik berupa putaran poros turbin. Pada sistem pembangkit skala kecil, turbin Kaplan banyak dipilih karena mampu bekerja pada karakteristik aliran rendah dengan efisiensi yang relatif baik.

Penelitian ini menggunakan turbin Kaplan tipe *fixed pitch*, yaitu turbin dengan sudut sudu yang tetap selama operasi. Pemilihan tipe *fixed pitch* dilakukan karena konstruksinya lebih sederhana, mudah diterapkan pada prototipe skala kecil, dan sesuai digunakan untuk kondisi aliran yang relatif konstan. Putaran yang dihasilkan turbin kemudian diteruskan menuju generator melalui sistem transmisi pulley untuk menghasilkan energi listrik.

2.3 Generator Sinkron Magnet Permanen Tiga Fasa

Generator sinkron magnet permanen atau *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) merupakan generator yang menggunakan magnet permanen pada rotor sebagai sumber medan magnet. Generator jenis ini tidak memerlukan sistem eksitasi eksternal sehingga lebih sederhana dan sesuai digunakan pada sistem pembangkit skala kecil, terutama pada kondisi putaran rendah. Pada saat rotor berputar, fluks magnet yang melewati kumparan stator berubah terhadap waktu sehingga menghasilkan gaya gerak listrik induksi (*electromotive force/EMF*). Besarnya tegangan yang dihasilkan dipengaruhi oleh jumlah lilitan, fluks magnet, konfigurasi kumparan, serta kecepatan putar rotor.

Generator yang digunakan pada penelitian ini merupakan generator magnet permanen tiga fasa dengan sambungan stator berbentuk bintang (Y). Konfigurasi tiga fasa dipilih karena menghasilkan keluaran daya yang lebih stabil dan lebih baik untuk proses penyearahan dibandingkan generator satu fasa. Tegangan keluaran generator selanjutnya disearahkan menggunakan *bridge rectifier* sebelum disalurkan menuju sistem pembebanan DC.

2.3.1 Magnet Permanen Ferrit

Magnet ferrit merupakan jenis magnet permanen berbasis material keramik yang memiliki harga relatif ekonomis, tahan korosi, serta mudah diperoleh dibandingkan magnet *rare-earth* seperti neodymium. Akan tetapi, magnet ferrit memiliki karakteristik remanensi dan kerapatan fluks magnet yang lebih rendah dibandingkan magnet neodymium sehingga membutuhkan rancangan generator yang sesuai agar tetap mampu menghasilkan induksi elektromagnetik yang baik. Pada penelitian ini, magnet ferrit digunakan sebagai sumber medan magnet rotor generator karena mempertimbangkan aspek biaya, ketersediaan material, serta kesesuaian

untuk prototipe generator skala kecil berbasis *micro hydro*.

2.4 Prinsip Induksi Elektromagnetik Generator

Prinsip dasar kerja generator listrik adalah induksi elektromagnetik sebagaimana dijelaskan dalam hukum Faraday, yaitu timbulnya gaya gerak listrik akibat perubahan fluks magnet terhadap penghantar. Pada generator magnet permanen, perubahan fluks magnet terjadi ketika rotor yang membawa magnet permanen berputar dan memotong kumparan stator sehingga menghasilkan tegangan listrik pada penghantar. Besarnya gaya gerak listrik induksi dipengaruhi oleh frekuensi, jumlah lilitan, fluks magnet, dan faktor belitan generator. Persamaan gaya gerak listrik induksi dinyatakan sebagai berikut:

$$E = 4.44 f N \Phi K_w$$

Keterangan:
E = gaya gerak listrik induksi (Volt),
f = frekuensi (Hz),
N = jumlah lilitan per fasa,
Φ = fluks magnet (Weber),
K_w = faktor belitan generator.

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi, jumlah lilitan, dan fluks magnet akan meningkatkan tegangan induksi generator. Dalam penelitian ini, pendekatan teoritis induksi elektromagnetik digunakan untuk memahami karakteristik performa generator hasil modifikasi pada berbagai kondisi pengujian.

2.5 Frekuensi Generator sinkron

Frekuensi generator sinkron merupakan jumlah siklus gelombang listrik yang dihasilkan generator dalam satu detik dan dinyatakan dalam Hertz (Hz). Pada generator sinkron, frekuensi dipengaruhi oleh jumlah kutub rotor dan kecepatan putar generator. Hubungan frekuensi terhadap putaran generator dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$f = \frac{Pn}{120}$$

Keterangan:
f = frekuensi generator (Hz),
P = jumlah kutub rotor,
n = putaran generator (RPM).

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi putaran rotor maka frekuensi listrik generator juga meningkat. Analisis frekuensi generator digunakan pada penelitian ini untuk mengetahui karakteristik performa generator berdasarkan variasi sistem transmisi pulley dan perubahan putaran generator.

2.6 Sistem Transmisi Pulley

Sistem transmisi pulley digunakan untuk meneruskan energi mekanik dari turbin menuju generator. Perubahan diameter pulley mempengaruhi perbandingan putaran antara poros penggerak dan poros generator sehingga berdampak terhadap performa keluaran generator. Hubungan rasio pulley terhadap putaran generator dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$N_1 D_1 = N_2 D_2$$

Keterangan:
N_1 = putaran pulley penggerak (RPM),
N_2 = putaran pulley generator (RPM),
D_1 = diameter pulley penggerak,
D_2 = diameter pulley generator.

Dalam penelitian ini digunakan variasi pulley 5×4,5; 5×4; 4×4,5; dan 4×4 untuk mengetahui pengaruh perubahan rasio transmisi terhadap RPM generator, tegangan keluaran, frekuensi, arus, dan daya listrik generator.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan *research and development* (R&D), yang bertujuan untuk merancang, merealisasikan, dan menguji performa generator listrik berbasis *micro hydro* sebagai supply energi alternatif skala kecil pada pos perbatasan personel TNI AD. Pendekatan eksperimen digunakan karena penelitian dilakukan melalui pengujian langsung terhadap parameter mekanik dan elektrikal generator hasil modifikasi untuk mengetahui karakteristik performanya pada berbagai kondisi operasi

Penelitian dilaksanakan selama lima bulan, mulai Februari hingga Juni 2026, dengan lokasi pengujian dilakukan pada aliran irigasi di lingkungan Politeknik Angkatan Darat serta aliran irigasi Desa Sekar Putih, Kecamatan Junrejo, Kota Batu. Tahapan penelitian meliputi karakterisasi internal generator, pengujian tanpa beban (*no-load test*), pengujian berbeban (*on-load test*), pengolahan data, dan analisis performa elektrikal generator.

3.1 Alat dan Bahan Penelitian

Peralatan penelitian digunakan untuk mendukung proses karakterisasi internal generator serta pengambilan data selama pengujian berlangsung. Alat ukur utama meliputi *tachometer digital* untuk mengukur putaran turbin dan generator, *multimeter digital* untuk mengukur tegangan, arus, dan hambatan generator, *clamp meter*, jangka sorong, mikrometer sekrup, serta komputer untuk pengolahan data. Komponen sistem yang digunakan meliputi generator magnet permanen tiga fasa hasil modifikasi, sistem transmisi pulley dan *belt*, *bridge rectifier* tiga fasa, MPPT controller, serta beban lampu LED DC 12 Volt.

Generator penelitian menggunakan konfigurasi tiga fasa sambungan bintang (Y) dengan rotor magnet permanen ferrit empat kutub. Variasi transmisi pulley yang digunakan terdiri atas 5 × 4,5 inci, 5 × 4 inci, 4 × 4,5 inci, dan 4 × 4 inci. Beban

pengujian berupa tiga buah lampu LED DC 12 Volt dengan total daya sebesar 52 Watt yang terdiri atas dua lampu 20 Watt dan satu lampu 12 Watt.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian terdiri atas variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Variabel bebas meliputi variasi rasio pulley sistem transmisi dan perubahan kecepatan putar generator (*RPM*). Variabel terikat meliputi tegangan keluaran AC (*VAC*), tegangan keluaran DC (*VDC*), arus listrik, daya listrik, frekuensi generator, *voltage drop*, dan *copper losses*. Adapun variabel kontrol dijaga tetap selama penelitian, yaitu jumlah kutub generator, konfigurasi sambungan tiga fasa bintang (Y), jumlah slot stator, diameter rotor, diameter penghantar, serta sistem penyearah dan MPPT yang digunakan.

3.3 Tahapan Pengujian

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis dimulai dari karakterisasi internal generator untuk mengetahui parameter geometrik dan elektrikal generator hasil modifikasi. Karakterisasi dilakukan dengan mengidentifikasi jumlah kutub rotor, konfigurasi sambungan stator, jumlah slot, diameter rotor, diameter kawat penghantar, panjang slot, serta hambatan terminal generator menggunakan alat ukur yang sesuai. Hasil karakterisasi digunakan sebagai dasar analisis performa elektrikal generator pada tahap pembahasan.

Pengujian tanpa beban (*no-load test*) dilakukan dengan memutar generator menggunakan sistem penggerak mula dan variasi rasio pulley tertentu tanpa dihubungkan pada beban listrik. Pada tahap ini dilakukan pengukuran RPM generator, tegangan keluaran AC (*VAC*), dan tegangan keluaran setelah penyearah (*VDC*). Tujuan pengujian ini adalah mengetahui hubungan antara perubahan putaran generator terhadap tegangan keluaran pada kondisi ideal tanpa pembebanan.

Selanjutnya dilakukan pengujian berbeban (*on-load test*) dengan konfigurasi sistem:

Generator → Bridge Rectifier → MPPT → Beban Lampu LED DC 12 Volt

Pada tahap ini generator dihubungkan ke beban lampu LED DC total 52 Watt untuk mengetahui kemampuan generator dalam menyuplai daya listrik pada kondisi kerja aktual. Parameter yang diukur meliputi RPM generator, tegangan AC (*VAC*), tegangan DC (*VDC*), arus listrik, dan daya keluaran generator. Pengujian dilakukan pada setiap variasi pulley untuk mengetahui pengaruh sistem transmisi terhadap performa elektrikal generator.

3.4 Teknik Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan pendekatan teoritis dan eksperimental untuk mengetahui karakteristik kerja generator berbasis *micro hydro*. Analisis dilakukan terhadap frekuensi generator, resistansi kumparan, hubungan tegangan terhadap putaran generator, *voltage drop*, *copper losses*, dan daya listrik generator. Frekuensi generator dihitung berdasarkan hubungan jumlah kutub dan kecepatan putar rotor menggunakan persamaan berikut:

$$f = \frac{Pn}{120}$$

Sedangkan daya listrik generator dihitung menggunakan hubungan antara tegangan dan arus keluaran sebagai berikut:

$$P = VI$$

Untuk mengetahui karakteristik internal generator, dilakukan analisis *voltage drop* dan *copper losses* berdasarkan hambatan penghantar kumparan generator pada kondisi berbeban. Hasil analisis selanjutnya dibandingkan dengan data eksperimen untuk mengetahui karakteristik performa generator listrik berbasis *micro hydro* pada berbagai kondisi operasi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi internal Generator

Karakterisasi internal generator dilakukan untuk mengetahui parameter geometrik dan elektrikal generator hasil modifikasi yang digunakan pada penelitian. Proses karakterisasi dilakukan melalui identifikasi konfigurasi generator, jumlah kutub rotor, jumlah slot stator, diameter rotor, diameter penghantar, panjang slot, serta hambatan terminal generator. Parameter tersebut digunakan sebagai dasar analisis performa elektrikal generator pada tahap pembahasan berikutnya.

Generator yang digunakan memiliki konfigurasi tiga fasa dengan sambungan bintang (Y), jumlah kutub rotor sebanyak empat kutub, serta jumlah slot stator sebanyak 24 slot. Hasil karakterisasi juga menunjukkan diameter rotor sekitar 56 mm, panjang slot 7,4 cm, diameter penghantar 0,8 mm, dan hambatan terminal sebesar 0,54 Ω. Konfigurasi sambungan bintang dipilih karena mampu menghasilkan tegangan terminal relatif lebih tinggi dibandingkan sambungan delta pada putaran yang sama, sehingga lebih sesuai untuk kebutuhan sistem pembangkit skala kecil berbasis *micro hydro*.

Parameter	Nilai
Konfigurasi generator	3 fasa sambungan Y
Jumlah kutub rotor	4 kutub
Jumlah slot stator	24 slot
Diameter rotor	56 mm
Panjang slot	7,4 cm
Diameter kawat	0,8 mm
Hambatan terminal	0,54 Ω

Tabel 1. Hasil karakterisasi internal generator

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa generator yang digunakan termasuk jenis *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) dengan konfigurasi yang mendukung pembangkitan listrik pada putaran rendah. Parameter geometrik dan elektrikal tersebut menjadi dasar dalam memahami hubungan antara RPM generator terhadap tegangan, frekuensi, daya listrik, serta rugi-rugi internal generator selama pengujian berlangsung.

4.2 Hasil Pengujian Tanpa Beban (*No-Load Test*)

Pengujian tanpa beban dilakukan untuk mengetahui karakteristik dasar generator ketika belum menerima pembebanan listrik. Pengujian dilakukan menggunakan variasi pulley yang berbeda sehingga menghasilkan perubahan kecepatan putar generator. Parameter yang diamati meliputi RPM generator, tegangan keluaran AC (*VAC*), dan tegangan keluaran setelah proses penyearahan (*VDC*).

Variasi pulley	RPM generator	VAC (V)	VDC (V)
5 × 4,5	1591	73,3	98,8
5 × 4	1838	84,8	114,0
4 × 4,5	1209	55,7	75,0
4 × 4	1438	66,4	89,5

Tabel 2. Hasil pengujian tanpa beban

Berdasarkan hasil pengujian terlihat bahwa peningkatan kecepatan putar generator diikuti peningkatan tegangan keluaran AC maupun DC. Variasi pulley 5 × 4 menghasilkan putaran generator tertinggi sebesar 1838 RPM dengan tegangan keluaran mencapai 84,8 VAC dan 114 VDC. Sebaliknya, variasi 4 × 4,5 menghasilkan putaran terendah sebesar 1209 RPM dengan tegangan keluaran lebih rendah. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan RPM rotor meningkatkan laju perubahan fluks magnet pada kumparan stator sehingga gaya gerak listrik induksi yang dihasilkan juga meningkat.

Hubungan antara putaran generator dan tegangan keluaran menunjukkan kecenderungan positif, di mana generator menghasilkan tegangan lebih tinggi ketika putaran rotor meningkat. Temuan ini menunjukkan bahwa variasi transmisi pulley memiliki pengaruh langsung terhadap performa generator pada kondisi tanpa beban.

4.3 Hasil Pengujian Berbeban (*On-Load Test*)

Pengujian berbeban dilakukan untuk mengetahui kemampuan generator dalam menyuplai energi listrik ketika dihubungkan dengan beban aktual berupa lampu LED DC 12 Volt total 52 Watt. Sistem pengujian dilakukan melalui konfigurasi generator–*bridge rectifier*–MPPT–beban lampu LED. Parameter yang diamati meliputi RPM generator, tegangan keluaran, arus listrik, dan daya keluaran generator.

Variasi pulley	RPM	VAC (V)	VDC (V)	Arus (A)	Daya (W)
5 × 4,5	1564	70,6	93,1	0,38	35,38
5 × 4	726	55,0	21,7	1,32	28,64
4 × 4,5	1189	52,8	68,9	0,52	35,83

Tabel 3. Hasil pengujian berbeban

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kondisi berbeban menyebabkan penurunan tegangan terminal generator dibandingkan kondisi tanpa beban. Hal tersebut terjadi karena sebagian energi listrik mengalami rugi-rugi internal pada kumparan generator serta sistem konversi daya sebelum mencapai beban. Variasi pulley 5 × 4,5 menghasilkan performa daya relatif baik, sedangkan variasi tertentu mengalami penurunan tegangan akibat perubahan RPM dan karakteristik pembebanan.

Secara umum, generator masih mampu menyuplai kebutuhan pembebanan DC selama proses pengujian berlangsung. Hal ini menunjukkan bahwa generator berbasis *micro hydro* memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif skala kecil pada wilayah dengan keterbatasan akses listrik.

4.4 Analisis Frekuensi Generator dan Tegangan Keluaran

Hubungan antara kecepatan putar rotor dan frekuensi generator dianalisis menggunakan persamaan frekuensi generator sinkron:

$$f = \frac{Pn}{120}$$

Pada kondisi putaran tertinggi sebesar 1838 RPM dengan jumlah kutub empat, generator menghasilkan frekuensi sekitar 61,27 Hz. Sebaliknya, pada putaran terendah sebesar 1209 RPM diperoleh frekuensi sekitar 40,30 Hz. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan putaran generator secara langsung meningkatkan frekuensi listrik yang dihasilkan.

Selain mempengaruhi frekuensi, peningkatan putaran generator juga meningkatkan tegangan keluaran akibat meningkatnya laju perubahan fluks magnet pada kumparan stator. Namun demikian, hubungan tersebut tidak selalu sepenuhnya linier karena dipengaruhi resistansi karakteristik internal genera kumparan, temperatur penghantar, pembebanan, dan karakteristik internal generator lainnya.

4.5 Analisis Resistansi Kumparan, *Voltage Drop*, dan *Copper Losses*

Analisis resistansi dilakukan untuk mengetahui karakteristik internal generator berdasarkan hambatan penghantar dan dimensi fisik kumparan. Berdasarkan hasil pengukuran, generator memiliki

hambatan terminal sebesar 0,54 Ω. Karena generator menggunakan sambungan bintang (Y), maka hambatan satu fasa diperkirakan sebesar 0,27 Ω. Nilai tersebut menunjukkan bahwa generator memiliki hambatan internal relatif rendah sehingga mampu menekan rugi-rugi resistif pada penghantar.

Penurunan tegangan (*voltage drop*) pada kondisi berbeban dihitung menggunakan pendekatan hambatan penghantar. Pada kondisi pengujian tertentu diperoleh nilai *voltage drop* teoritis sekitar 0,393 Volt, sedangkan hasil aktual menunjukkan penurunan tegangan yang lebih besar. Perbedaan ini menunjukkan bahwa rugi tegangan generator tidak hanya dipengaruhi hambatan penghantar, tetapi juga kondisi pembebanan, karakteristik kumparan, dan rugi internal lainnya selama operasi generator berlangsung.

Selain itu, hambatan kumparan juga menyebabkan sebagian energi listrik terdisipasi menjadi panas yang dikenal sebagai *copper losses*. Rugi daya tembaga meningkat seiring peningkatan arus pembebanan, sehingga mempengaruhi efisiensi elektrikal generator. Dengan demikian, analisis resistansi, *voltage drop*, dan *copper losses* dapat digunakan sebagai dasar evaluasi performa generator berbasis *micro hydro* pada kondisi operasi aktual.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil rancang bangun, karakterisasi, pengujian, dan analisis performa generator listrik berbasis *micro hydro*, dapat disimpulkan bahwa generator magnet permanen tiga fasa berbasis *micro hydro* mampu mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui sistem transmisi pulley dan *belt*. Hasil karakterisasi menunjukkan generator memiliki konfigurasi tiga fasa sambungan bintang (Y), jumlah kutub empat, dan konfigurasi stator 24 slot sehingga mampu menghasilkan keluaran listrik AC maupun DC yang dipengaruhi oleh perubahan putaran generator. Pengujian tanpa beban (*no-load test*) dan berbeban (*on-load test*) menunjukkan bahwa variasi rasio pulley berpengaruh terhadap kecepatan putar generator, tegangan keluaran, frekuensi, arus, dan daya listrik. Semakin tinggi putaran generator, kecenderungan tegangan dan frekuensi keluaran juga meningkat. Selain itu, analisis performa elektrikal menunjukkan bahwa resistansi kumparan, *voltage drop*, dan *copper losses* mempengaruhi karakteristik kerja generator selama proses pembebanan, sehingga parameter tersebut dapat digunakan sebagai dasar evaluasi performa generator listrik berbasis *micro hydro* sebagai supply energi alternatif skala kecil pada wilayah perbatasan.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengembangan pada sistem *micro hydro*, khususnya optimasi sistem transmisi pulley, karakteristik turbin, serta konfigurasi generator untuk memperoleh performa keluaran listrik yang lebih baik. Selain itu, penelitian berikutnya dapat menambahkan analisis efisiensi total sistem pembangkit yang meliputi efisiensi mekanik, elektrikal, dan rugi-rugi sistem secara keseluruhan agar karakteristik performa generator dapat dievaluasi lebih komprehensif. Pengembangan penelitian juga dapat diarahkan pada penerapan sistem penyimpanan energi dan sistem pengondisian daya yang lebih terintegrasi guna mendukung pemanfaatan energi listrik secara lebih stabil pada wilayah terpencil maupun pos perbatasan personel TNI AD.

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. Setyawan and M. Nakhoda, “Rancang Bangun Generator Magnet Permanen Fluks Radial Satu Fasa untuk Pembangkit Pico Hydro Menggunakan Turbin Propeller pada Saluran Air,” *Jurnal Teknik Energi*, vol. 10, no. 2, pp. 45–53, 2020.

[2] A. Rochman and D. Hermawan, “Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Tipe Screw Menggunakan Generator Magnet Permanen,” *Jurnal Rekayasa Energi dan Manufaktur*, vol. 7, no. 1, pp. 31–39, 2022.

[3] A. Kurniawan, “Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Tipe Kaplan pada Aliran Sungai Brantas,” *Jurnal Energi Terbarukan Indonesia*, vol. 12, no. 1, pp. 15–26, 2023.

[4] Z. Krzemianowski, M. Nowak, and P. Kowalski, “High Specific-Speed Kaplan Turbines for Small Hydropower Plants under Ultra-Low and Low Head Conditions,” *Renewable Energy*, vol. 205, pp. 112–123, 2023.

[5] U. Aripriharta, et al., “Evaluation of Portable Pico Hydro System Performance under Low Head and Low Discharge Conditions,” *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 15, no. 2, pp. 245–256, 2025.

[6] Y. Wei, X. Zhang, and J. Liu, “Low-Speed High-Efficiency Permanent Magnet Generator for Micro-Hydropower Systems,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1120–1129, 2020.

[7] M. Sarac, H. Demir, and T. Kaya, “Ferrite Magnets in Electrical Machine Applications: Characteristics and Performance Review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 98, pp. 210–218, 2025.

[8] R. Silva, “Nonlinear Modeling of Ferrite Permanent Magnets in Electrical

Machines," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 102233–102245, 2023.
[9] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012.
[10] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans, *Electric Machinery*, 6th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2003.
[11] Eclipse Magnetics, "Ferrite Magnet Technical Data Sheet," 2024. [Online]. Available: manufacturer technical documentation.
[12] TDK Corporation, "Ferrite Magnet Material Characteristics," 2024. [Online]. Available: manufacturer technical documentation.