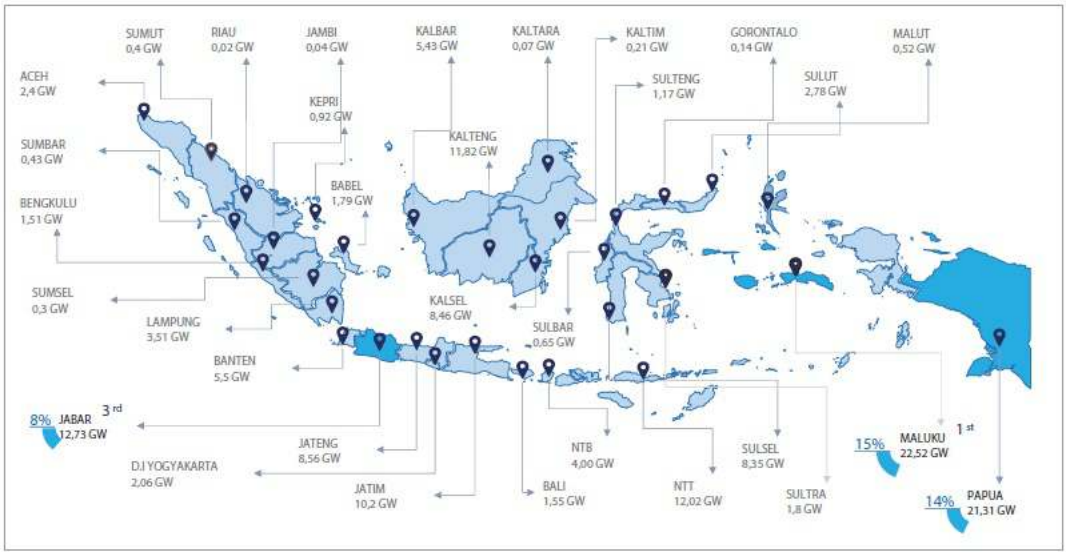
BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki kelebihan geografis yang tidak dimiliki banyak negara lain. Dengan garis pantai yang sangat panjang dan wilayah laut yang luas, Indonesia menyimpan potensi energi angin yang cukup besar untuk dimanfaatkan. Sejumlah wilayah, baik *onshore* maupun *offshore*, tercatat memiliki kecepatan angin rata-rata berada pada kisaran 3 m/s hingga 6 m/s. Pada kisaran tersebut, energi angin sebenarnya sudah dapat dikonversi menjadi energi listrik bila menggunakan teknologi yang tepat. Berdasarkan kajian potensi energi bayu nasional, total potensi energi angin Indonesia diperkirakan dapat mencapai 154,9 GW [1]. Selain energi angin, tren pengembangan energi terbarukan di Indonesia juga tercermin dari pertumbuhan PLTS serta kebutuhan kajian keekonomian/risiko implementasinya sebagai bagian dari transisi energi [2], [3].



Gambar 1 Peta sebaran potensi energi angin indonesia

Jika melihat sebaran geografisnya, potensi energi angin terbesar berada di kawasan Indonesia Timur. Pada Gambar 1, terlihat bahwa provinsi Maluku memiliki potensi sebesar 22,52 GW, disusul oleh Papua dengan potensi mencapai 21,31 GW. Wilayah-wilayah ini memiliki pola angin yang lebih stabil dibandingkan wilayah lainnya, sehingga peluang pemanfaatannya untuk pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) semakin besar.

Meskipun potensi energi angin Indonesia cukup besar, sebagian besar wilayah terutama daerah pedesaan dan pulau-pulau kecil masih didominasi angin berkecepatan rendah. Angin dengan kecepatan sekitar 3–5 m/s masih menjadi karakteristik umum di banyak lokasi [4]. Kondisi seperti ini menyulitkan penerapan turbin angin konvensional yang biasanya membutuhkan angin dengan kecepatan lebih tinggi agar dapat menghasilkan daya listrik secara optimal.

Dalam menghadapi kondisi kecepatan angin rendah tersebut, dibutuhkan teknologi generator yang mampu bekerja pada putaran rendah, memiliki torsi awal kecil, dan tetap mampu menghasilkan tegangan dengan stabil. Selain aspek torsi awal, integrasi pembangkit pada sistem distribusi juga perlu mempertimbangkan profil tegangan dan rugi-rugi daya, karena penempatan pembangkit pada titik yang tepat terbukti dapat memperbaiki kualitas tegangan dan menurunkan rugi daya pada jaringan distribusi [5]. Salah satu teknologi yang sesuai untuk kebutuhan ini adalah Permanent Magnet Generator (PMG). PMG tidak membutuhkan arus eksitasi dan lebih efisien pada kecepatan rendah, sehingga secara teknis lebih sesuai untuk sistem turbin angin skala kecil hingga menengah yang memanfaatkan energi angin rendah.

Namun, PMG tidak terlepas dari kendala teknis. Masalah utama yang sering muncul adalah torsi *cogging*, yaitu torsi parasitik yang timbul akibat interaksi antara magnet permanen rotor dan slot stator. Nilai torsi *cogging* yang tinggi dapat menyebabkan rotor sulit mulai berputar, terutama ketika dorongan angin sangat kecil. Pada konteks Indonesia yang banyak memiliki wilayah berangin rendah, keberadaan torsi *cogging* menjadi faktor kritis yang harus diminimalkan.

Salah satu konfigurasi PMG yang berpotensi untuk aplikasi kecepatan rendah adalah kombinasi 40 kutub rotor dan 24 slot stator. Konfigurasi ini mampu menghasilkan

tegangan pada putaran rendah karena jumlah kutub yang besar meningkatkan frekuensi perubahan fluks. Akan tetapi, pola distribusi magnet dan slot pada kombinasi 40/24 tersebut berpotensi menghasilkan torsi *cogging* yang relatif tinggi apabila tidak dioptimalkan.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa torsi *cogging* dapat dikurangi melalui beberapa metode, seperti modifikasi profil magnet (magnet-edge profiling) dan penyesuaian celah antar slot (slot opening). Modifikasi profil magnet dapat membuat perubahan fluks lebih halus ketika magnet melewati tepi slot, sedangkan pengaturan slot opening membantu menyeimbangkan distribusi medan magnet sehingga torsi *cogging* dapat ditekan. Kedua metode ini saling melengkapi dan dapat diterapkan tanpa mengubah dimensi utama PMG secara signifikan [6].

Namun, sebagian besar kajian yang ada masih berfokus pada satu teknik optimasi saja atau diterapkan pada konfigurasi slot–pole yang berbeda, sehingga hasilnya tidak selalu dapat langsung digeneralisasi pada PMG multipole dengan konfigurasi 40 kutub/24 slot untuk turbin angin kecepatan rendah. Selain itu, studi yang secara khusus menguji kombinasi modifikasi tepi magnet (*magnet edge shaping*) dan pengaturan celah antar slot (slot opening) dalam rentang perubahan kecil tanpa mengubah dimensi utama mesin masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini memfokuskan optimasi pada dua variabel tersebut untuk menurunkan torsi *cogging* secara signifikan sekaligus mengevaluasi perubahan distribusi fluks pada celah udara.

Melihat kondisi geografis Indonesia dan kebutuhan akan generator yang sesuai untuk angin rendah, penelitian mengenai reduksi torsi *cogging* pada PMG 40 kutub 24 slot melalui modifikasi profil magnet dan celah antar slot menjadi sangat penting. Upaya ini diharapkan dapat mendukung pemanfaatan energi angin di daerah terpencil maupun pulau-pulau kecil yang selama ini masih sulit mendapatkan pasokan listrik yang memadai.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang sebelumnya, terdapat beberapa persoalan utama yang perlu diteliti lebih mendalam. Permasalahan pertama berkaitan dengan

karakteristik angin di Indonesia yang sebagian besar berada pada kategori kecepatan rendah. Kondisi ini menuntut penggunaan generator yang mampu bekerja efektif pada putaran pelan, namun PMG yang digunakan sering kali menghadapi kendala berupa torsi *cogging* yang cukup besar. Torsi *cogging* inilah yang dapat menghambat putaran awal rotor dan pada akhirnya menurunkan performa turbin angin pada kondisi angin rendah.

Selain itu, pada konfigurasi PMG 40 kutub dan 24 slot, interaksi antara magnet rotor dan slot stator cenderung menghasilkan lonjakan-lonjakan gaya tarik magnetik yang menyebabkan torsi *cogging* (*cogging torque*) meningkat. Apabila tidak dikendalikan, hal ini dapat berdampak pada kesulitan *self-starting* dan penurunan efisiensi konversi energi.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa modifikasi profil magnet serta penyesuaian celah antar slot dapat menjadi solusi yang efektif untuk menurunkan torsi *cogging* (*cogging torque*). Namun, sejauh mana dua metode tersebut dapat diterapkan secara optimal pada konfigurasi 40/24 masih perlu dikaji secara sistematis. Oleh karena itu, rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah:

1) Bagaimana pengaruh modifikasi tepi magnet (*magnet edge shaping*) terhadap nilai torsi *cogging* pada Permanent Magnet Generator 40 kutub 24 slot?
2) Bagaimana perubahan celah antar slot stator mempengaruhi densitas fluks magnet dan karakteristik torsi *cogging*?
3) Apakah kombinasi antara modifikasi tepi magnet (*magnet edge shaping*) dan celah antar slot dapat memberikan reduksi torsi *cogging* yang lebih signifikan dibandingkan hanya menggunakan salah satu metode?
4) Bagaimana pengaruh modifikasi tersebut terhadap indikator performa elektromagnetik yang relevan untuk aplikasi angin berkecepatan rendah (misalnya kecenderungan *self-starting* yang direpresentasikan melalui penurunan torsi *cogging* dan pemeriksaan peta/densitas fluks)?

1.3 Tujuan

Penelitian ini dilakukan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai upaya pengurangan torsi *cogging* pada Permanent Magnet Generator yang

digunakan untuk aplikasi angin berkecepatan rendah. Berdasarkan rumusan masalah yang telah disampaikan, tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1) Menganalisis pengaruh modifikasi tepi magnet (*magnet edge shaping*) terhadap nilai torsi *cogging* maksimum absolut (Tabs,max) pada PMG 40 kutub/24 slot.
2) Menganalisis pengaruh variasi celah atar slot (*slot opening*) terhadap perubahan Tabs,max dan distribusi densitas fluks (B) pada celah udara.
3) Menentukan kombinasi parameter paling efektif (edge shaping + slot opening) yang menghasilkan penurunan Tabs,max terbesar dibandingkan desain dasar (*baseline*) (slot opening 2,0 mm tanpa edge shaping) dengan target reduksi ≥ 98% terhadap *baseline*.

1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik dari sisi akademis maupun praktis. Adapun manfaat yang ingin dicapai antara lain sebagai berikut:

1) Manfaat Akademis

Penelitian ini dapat menjadi acuan bagi pengembangan kajian mengenai Permanent Magnet Generator, khususnya yang berkaitan dengan reduksi torsi *cogging* pada konfigurasi multipole seperti 40 kutub 24 slot. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat memperkaya literatur akademik mengenai pengaruh modifikasi tepi magnet dan celah antar slot terhadap performa elektromagnetik PMG, sehingga dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan di bidang konversi energi listrik.

2) Manfaat Praktis

Hasil penelitian ini dapat menjadi rujukan bagi perancang dan pengembang sistem turbin angin skala kecil yang beroperasi pada kecepatan rendah, terutama di wilayah Indonesia yang memiliki potensi angin terbatas. Dengan menurunnya torsi *cogging* melalui metode yang diteliti, PMG dapat bekerja lebih baik pada kondisi angin rendah, meningkatkan kemampuan *self-starting*, serta membantu menghasilkan daya listrik yang lebih stabil. Selain itu, hasil penelitian ini dapat membuka peluang bagi industri atau

laboratorium untuk menerapkan modifikasi geometri yang sederhana namun efektif pada PMG yang sedang dikembangkan.

3) Manfaat Sosial dan Energi Terbarukan

Secara lebih luas, penelitian ini dapat mendukung pengembangan teknologi energi bersih dan terbarukan di Indonesia, terutama di daerah terpencil dan pulau-pulau kecil yang belum terjangkau jaringan listrik. Pada konteks kelistrikan pulau kecil, pendekatan sistem pembangkit hybrid dilaporkan mampu meningkatkan keandalan pasokan melalui optimalisasi kontribusi energi terbarukan [7]. Sejalan dengan itu, penerapan PMG dengan torsi *cogging* yang rendah berpotensi meningkatkan keandalan pembangkit angin berskala kecil, khususnya pada kondisi angin berkecepatan rendah, sehingga dapat mendukung penyediaan sumber energi alternatif yang lebih berkelanjutan bagi masyarakat.

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Untuk menjaga penelitian ini tetap terarah dan sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai, beberapa batasan atau ruang lingkup penelitian ditetapkan sebagai berikut:

1) Objek penelitian difokuskan pada Permanent Magnet Generator dengan konfigurasi 40 kutub rotor dan 24 slot stator, dengan parameter fisik sebagai batasan utama. Diameter rotor yang digunakan adalah 120 mm dengan material M-19, ketebalan magnet 5 mm dengan material NdFeB 32 MGOe, celah udara antara rotor dan stator ditetapkan sebesar 1 mm dan ketebalan stator adalah 26,6 mm dengan material M-19. Nilai-nilai ini ditetapkan sebagai parameter tetap dalam simulasi untuk memastikan analisis dilakukan pada kondisi geometri yang jelas dan konsisten.
2) Modifikasi yang diteliti hanya berfokus pada dua bagian utama dari PMG, yaitu: modifikasi tepi magnet (*magnet edge shaping*) (mengikuti permukaan rotor, 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm dan 2 mm) dan celah antar slot (*slot opening*) (1,8 mm, 2 mm dan 2,2 mm). Dengan magnet mengikuti permukaan rotor dan celah anatar slot 2 mm sebagai desain dasar.

3) Seluruh proses pemodelan dan simulasi dilakukan menggunakan software FEMM 4.2 untuk membuat geometri PMG, menerapkan modifikasi bentuk magnet dan slot stator, serta menganalisis torsi *cogging* dan distribusi fluks menggunakan metode Finite Element.

4) Penelitian ini tidak membahas aspek mekanis dan strukturals, seperti getaran mekanik, fatigue, ataupun analisis termal. Fokus utama adalah pada performa elektromagnetik dan nilai torsi *cogging* (*cogging torque*).

5) Sumber penggerak rotor tidak dianalisis, sehingga penelitian tidak mencakup desain turbin angin, karakteristik blade, atau dinamika angin. Turbin angin dianggap sebagai penggerak eksternal yang memberikan putaran pada PMG.

6) Validasi bersifat komputasi, sehingga pembuatan prototipe fisik tidak menjadi bagian wajib dalam penelitian ini. Namun demikian, hasil penelitian diharapkan dapat digunakan sebagai dasar pengembangan prototipe di masa mendatang.

7) Penelitian ini tidak mengevaluasi performa elektris PMG seperti *back* EMF, tegangan keluaran, daya keluaran maupun efisiensi generator. Analisis difokuskan pada karakteristik elektromagnetik berupa torsi *cogging* dan distribusi densitas fluks magnet.

1.6 Kebaharuan

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan yang digunakan dalam menganalisis reduksi torsi cogging pada Permanent Magnet Generator (PMG) dengan konfigurasi 40 kutub dan 24 slot. Berbagai penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa modifikasi geometri rotor maupun stator dapat digunakan untuk mereduksi torsi cogging. Namun demikian, penelitian-penelitian tersebut umumnya menerapkan satu metode modifikasi geometri atau menggunakan konfigurasi kutub–slot yang berbeda sehingga karakteristik elektromagnetik yang dihasilkan belum dapat secara langsung dijadikan acuan untuk konfigurasi PMG 40 kutub dan 24 slot. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan pendekatan berupa kombinasi modifikasi tepi magnet (magnet edge shaping) dan variasi bukaan slot stator (slot opening) untuk mengevaluasi pengaruh kedua

parameter tersebut terhadap karakteristik elektromagnetik PMG pada konfigurasi 40 kutub dan 24 slot.

Pendekatan yang digunakan dilakukan melalui evaluasi beberapa kombinasi parameter modifikasi tepi magnet dan bukaan slot stator sehingga pengaruh masing-masing parameter maupun pengaruh kombinasinya terhadap torsi cogging dapat dianalisis secara sistematis. Melalui pendekatan tersebut, penelitian ini tidak hanya bertujuan memperoleh konfigurasi geometri yang menghasilkan nilai torsi cogging paling rendah, tetapi juga mengidentifikasi hubungan antara perubahan geometri rotor dan stator terhadap distribusi densitas fluks magnet sebagai dasar dalam menjelaskan mekanisme penurunan torsi cogging. Dengan demikian, penelitian ini memberikan pendekatan analisis yang lebih komprehensif dalam mengevaluasi pengaruh kombinasi parameter geometri terhadap karakteristik elektromagnetik PMG.

Berdasarkan pendekatan tersebut, penelitian ini menghasilkan rekomendasi konfigurasi geometri berupa kombinasi modifikasi tepi magnet dan bukaan slot stator yang efektif dalam mereduksi torsi cogging tanpa mengubah dimensi utama rotor maupun stator. Selain menghasilkan konfigurasi yang optimum, penelitian ini juga memberikan kontribusi dalam memperjelas hubungan antara modifikasi geometri, distribusi densitas fluks magnet, dan karakteristik torsi cogging pada PMG 40 kutub dan 24 slot. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu referensi dalam pengembangan desain Permanent Magnet Generator untuk aplikasi turbin angin berkecepatan rendah serta menjadi dasar bagi penelitian lanjutan yang berkaitan dengan optimasi karakteristik elektromagnetik PMG.