

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada tahun 2014 sekitar 95% kebutuhan energi di Indonesia dipenuhi dari bahan bakar fosil, antara lain minyak, batu bara, dan gas alam. Sedangkan yang 5% dicatu dari energi terbarukan antara lain air, angin dan panas bumi (Kementerian ESDM, 2015).

Kebutuhan energi listrik sudah menjadi bagian dari hajat hidup orang banyak. Pelaksanaan usaha penyediaan energi listrik dilakukan oleh pemerintah dan pemerintah daerah. Namun demikian, badan usaha swasta, koperasi dan swadaya masyarakat dapat berpartisipasi. Di Indonesia terdapat 78.609 desa dengan jumlah rumah tangga 64.835.092. (Kementerian ESDM, 2015). Rumah tangga yang sudah berlistrik baik oleh PLN maupun non PLN sejumlah 54.690.431 atau 84,35% . Rumah tangga yang belum berlistrik sebagian besar tinggal di pedesaan terutama di luar pulau Jawa. Di daerah pedesaan terutama di dataran tinggi banyak tersedia sumber energi terbarukan.

Pembangunan listrik pedesaan berperan penting dalam peningkatan rasio elektrifikasi. Dengan rasio elektrifikasi rumah tangga sekitar 84,35% pada akhir tahun 2014, berarti masih ada sekitar 15,65% atau 10.146.692 rumah tangga yang belum berlistrik (PT. PLN, 2015).

1.1.1 Sumber energi

Angin adalah gerakan udara di permukaan bumi karena perbedaan tekanan udara. Udara panas mempunyai kerapatan yang lebih rendah sehingga akan naik ke atas dan digantikan udara dingin.

Turbin angin adalah mesin yang mengubah energi kinetik yang terkandung dalam gerak angin menjadi energi mekanik. Selanjutnya energi mekanik diubah menjadi energi listrik oleh generator. Kecenderungan yang dilakukan saat ini adalah membangun ‘perkebunan’ pembangkit listrik tenaga angin /bayu (PLTB). Beberapa PLTB yang saling dihubungkan secara kelistrikan dalam kelompok untuk mencapai nilai ekonomi yang tinggi. Kelemahan PLTB adalah aliran udara yang tidak konstan sehingga dibutuhkan teknologi penyimpan energi (Rogdakis, *et al.*, 2012). Gambar 1.1 menunjukkan pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) modern (Wenping, *et al.*, 2012).



Gambar 1.1 : Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Modern
Wenping, *et al.*, 2012.

Energi air merupakan sumber daya terbarukan melalui penguapan oleh matahari. Hal utama yang kurang menguntungkan untuk pemanfaatan energi untuk membangkitkan energi listrik adalah biaya modal awal yang tinggi (Mismail, 1989).

Pembangkit listrik tenaga air skala kecil yang dinamai Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dapat dibangun dengan biaya yang relatif rendah (Petrea, *at al.*, 2013). Kelayakannya akan meningkat dengan memanfaatkan bahan dan sarana yang tersedia di lokasi setempat.



Gambar 1.2: PLTMH sederhana dengan penggerak kincir air

Bahan bakar minyak digunakan untuk pembangkit listrik yang relatif kecil dan terpisah. Pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) di Indonesia masih dominan terutama di luar Jawa (PT. PLN, 2015). Bahan bakar minyak digunakan sebagai bahan bakar motor bakar yang menggerakkan generator. Gambar 1.3 menunjukkan salah satu gen-set (gabungan antara motor diesel dan generator listrik)(Yanmar Industri, 2010).

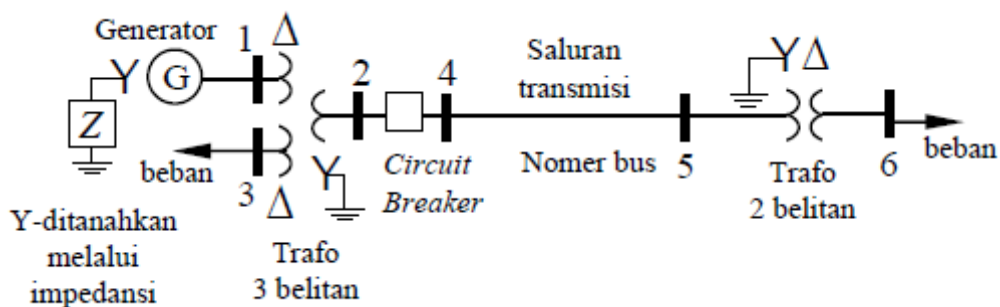


Gambar 1.3: Diesel Generator Set
Yanmar Industri, Tokyo Japan, 2010

1.1.2 Jaringan listrik di Indonesia

Indonesia sebagai negara kepulauan di daerah tropis mempunyai kekhasan tersendiri. Kondisi alam yang mencakup keadaan iklim, cuaca, keadaan geologi dan masalah gempa ikut menentukan penempatan lokasi instalasi peralatan listrik. Spesifikasi rancangan peralatan listrik, syarat-syarat teknis pembuatan, pemasangan, pengujian, dan pemeliharaan harus memenuhi standar. Perusahaan Listrik Negara (PT. PLN) telah menerbitkan berbagai acuan baku yang dikenal Standar Perusahaan Listrik Negara. Secara berkala acuan baku tersebut yaitu Peraturan Umum Instalasi Listrik (PUIL 2011) dievaluasi.

Susunan sistem jaringan listrik pada dasarnya adalah seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1.4. Adapun listrik yang dibangkitkan oleh PLN adalah listrik yang mengacu pada SPLN dan PUIL berupa arus bolak-balik dengan frekuensi 50 Hz.



Gambar 1.4: Susunan sistem jaringan listrik
Sudirham, 2012

Sebenarnya jaringan listrik PLN tidak sesederhana itu, generator dapat dihubungkan ke rel gardu induk atau ke gardu distribusi. Beban adalah pengguna yang mengambil daya listrik dari jaringan distribusi. Untuk beban rumah tangga tersambung pada jaringan distribusi tegangan rendah (220/380 V) sedang beban industri pada jaringan distribusi tegangan menengah (20 kV). Untuk daerah terpencil biaya penyambungan ke sistem jaringan sangat mahal, oleh sebab itu masih banyak menggunakan diesel generator set.

1.1.3 Pembangkit listrik skala kecil

Untuk menyalurkan listrik ke rumah tangga, upaya-upaya yang dilakukan secara ekonomis akan semakin mahal apabila jaringan harus menjangkau daerah-daerah terpencil. Untuk menghadapi tantangan tersebut, solusi listrik *off-grid* menjadi pilihan menarik (Kalla, *et al.*, 2014). Oleh karena itu penggunaan pembangkit listrik skala kecil seperti

PLTMH, PLTPB yang menggunakan energi setempat menjadi pilihan (Murthy *et al.*, 2012).

Penggunaan motor induksi sebagai generator pada pembangkit listrik skala kecil seperti PLTMH dan PLTB di daerah terpencil menjadi alternatif (Ojo, *et al.*, 1995; Chan *et al.*, 2005; Leicht, *et al.*, 2013; Senthilkumar, 2010; Kalla, *et al.*, 2015).

Beban di daerah pedesaan umumnya beban satu fasa, maka akan lebih menguntungkan apabila generator yang digunakan generator satu fasa. Untuk itu pembangunan pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan generator induksi satu fasa penguatan sendiri menjadi salah satu pilihan yang menjanjikan (Kalla, *et al.*, 2015; Leicht, *et al.*, 2013; Nazir R., 2007).

1.1.4 Generator induksi

Mesin induksi digunakan sebagai generator penguatan sendiri diperkenalkan oleh Bassett dan Potter pada tahun 1935 (Habash, *et al.*, 2012). Semenjak itu mesin induksi sebagai generator pada pembangkit listrik dengan sumber energi terbarukan lebih dikenal (Ahshan R. *et al.*, 2009).

Mesin induksi dapat beroperasi sebagai generator jika diputar sedikit di atas kecepatan sinkron dan dicatu daya reaktif yang dibutuhkan untuk penguatan kemagnetannya (Chatterjee, *et al.*, 2014; Kheldoun A., *et al.*, 2012). Generator induksi memiliki konstruksi yang kokoh, sederhana, handal, murah dan membutuhkan perawatan yang sedikit dibandingkan dengan generator sinkron (Ahshan, *et al.*, 2009; Boora, 2009; Singh G. K., 2004; Senthilkumar M., 2010; Habash *et al.*, 2012; Mesemanolis *et al.*, 2012; Rogdakis G., *et al.*, 2012.). Di samping itu, generator induksi juga memiliki proteksi diri terhadap beban lebih dan hubung singkat (Murthy *et al.*, 2012; Kalla *et al.*, 2014). Kelemahan generator induksi penguatan sendiri ialah sulit dalam hal pengaturan tegangan. Oleh karena itu Sistem kontrol tegangan dibutuhkan agar tegangan pada terminal relatif konstan (Ahshan *et al.*, 2009).

Generator induksi dapat bekerja pada dua kondisi yaitu terhubung paralel dengan jaringan atau berdiri sendiri (Nazir, 2007). Untuk yang terhubung paralel, generator induksi dapat menarik daya reaktif dari jaringan. (Murthy, *et al.*, 2011; Murthy, *et al.*, 2012; Leicht, *et al.*, 2013)). Untuk yang terpisah dengan jaringan, generator induksi tidak dapat membangkitkan daya reaktif. Oleh karena itu generator perlu dihubungkan dengan kapasitor yang dipasang pada terminal kumparan untuk penguatannya (Murthy, *et al.*,

1998; Ojo, *et al.*, 1998). Kapasitor akan membangkitkan daya reaktif yang dibutuhkan generator dan sekaligus untuk beban (Lalwani, *et al.*, 2011).

Generator induksi penguatan sendiri meskipun sudah dikenal lebih dari setengah abad yang lalu, sampai kini masih terus dikembangkan (Habash, *et al.*, 2012).

Generator induksi yang digunakan dalam disertasi ini adalah motor induksi jenis motor kapasitor yang mudah diperoleh di pasaran bebas. Agar dapat berfungsi sebagai generator induksi putaran rendah diperlukan rekonstruksi susunan kumparan stator.

Rekonstruksi yang dimaksud adalah mengubah susunan dan jumlah lilit kumparan stator untuk meningkatkan jumlah kutub. Akibat peningkatan jumlah kutub diperoleh penurunan putaran (McPherson, *et al.*, 1990; Sawhney, 1990). Perubahan susunan dan jumlah lilit kumparan berdampak pada perubahan nilai impedansi kumparan, yaitu nilai resistansi dan induktansinya. Perubahan nilai resistansi dan induktansi ini berpengaruh terhadap unjuk kerja generator, salah satunya adalah dalam hal pengasutan.

1.1.5 Impedansi kumparan generator

Kumparan generator merupakan konduktor berisolasi yang dililit dan disusun sesuai dengan kondisi ruang alur stator yang tersedia. Dari lilitan ini, terjadi adanya resistansi, induktansi dan kapasitansi. Pada kumparan, nilai kapasitansi sangat rendah sehingga dapat diabaikan (Sawhney, 1990).

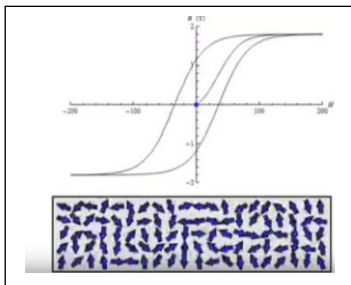
Pada operasi generator, parameter yang berpengaruh adalah resistansi dan induktansi kumparan generator (Bodson, *et al.*, 2011; Lalwani, *et al.*, 2011; Murthy, *et al.*, 1989; Leicht, *et al.*, 2013). Resistansi menyebabkan kerugian daya dan induktansi berkaitan dengan penyimpanan energi. Oleh karena itu nilai resistansi dan induktansi kumparan generator menjadi hal yang penting untuk pengasutan.

1.1.6 Pengasutan generator induksi

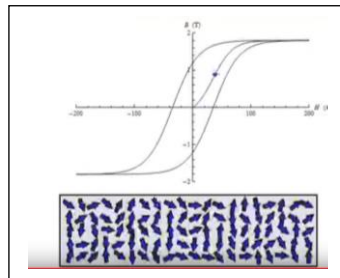
Pengasutan generator induksi adalah proses pengawalan dari keadaan diam hingga timbul tegangan dalam kondisi mantap (Leicht A., *et al.*, 2013; Wang Li, *et al.*, 1999; Mismail, 1989). Remanensi magnetik dibutuhkan untuk penguatan awal generator induksi penguatan sendiri. Pengasutan berhasil karena pada inti besi generator terdapat remanensi magnet, yaitu magnet sisa akibat dari operasi mesin sebelumnya dan sifat histeresis inti besi mesin (Sasikumar, *et al.*, 2012; Murthy, 1993).

Histeresis mesin terjadi ketika pada inti besi dengan orientasi elemen magnet yang tak teratur, menjadikan besi tidak bermagnet seperti pada Gambar 1.5a. Ketika besi dililiti

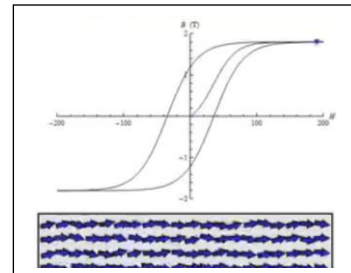
kumparan yang dialiri arus listrik dengan arah tertentu, maka susunan elemen magnet lebih teratur dengan banyak kutub yang sama seperti pada Gambar 1.5b. Ketika susunan elemen magnet dalam inti besi teratur dengan kutub yang seragam, maka inti besi tersebut menjadi bermagnet yang kuat seperti yang terlihat pada Gambar 1.5c.



Gambar 1.5a



Gambar 1.5b



Gambar 1.5c

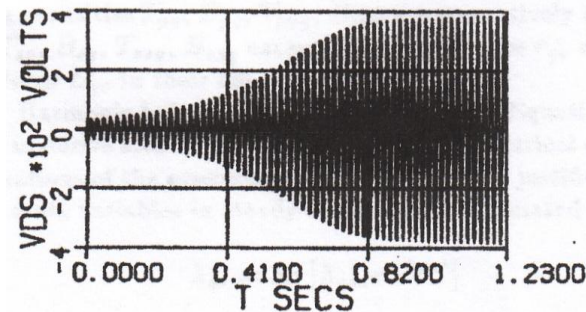
Gambar 1.5a: Histerisis ketika kumparan belum dialiri arus, orientasi elemen magnet pada inti besi berhamburan sehingga tidak bermagnet.

Gambar 1.5b: Histerisis ketika kumparan dialiri arus yang rendah, orientasi elemen magnet pada inti besi mulai teratur sehingga besi bermagnet rendah .

Gambar 1.5c: Histerisis ketika kumparan dialiri arus yang besar, orientasi elemen magnet pada inti besi teratur sehingga besi bermagnet yang kuat .

Remanensi magnet dapat diperkirakan besarnya melalui pengukuran tegangan pada terminal generator tanpa kapasitor penguat (Mismail, 1989). Apabila tegangan remanensi cukup kuat, adanya rangkaian tertutup antara kumparan stator generator dengan kapasitor mengakibatkan arus dapat mengalir. Aliran arus yang mengisi kapasitor akan terus meningkat hingga pada kondisi mantap.

Arus kapasitor pada proses pengasutan menimbulkan peningkatan medan magnet stator. Kenaikan medan magnet stator menjadikan tegangan di sisi rotor yang sedang berputar meningkat. Tegangan rotor yang meningkat menjadikan arus dan medan magnet di rotor juga meningkat. Medan magnet rotor balik menginduksi stator mengakibatkan peningkatan tegangan stator. Peningkatan tegangan rotor dan stator terus berlangsung hingga tercapai kondisi mantap. Salah satu contoh gelombang tegangan dari proses pengasutan yang berhasil hingga tercapai tegangan mantap seperti pada gambar 1.6 (Ojo, *et al.*, 1995; Mismail, 1989).



Gambar 1.6: Gelombang tegangan proses pengasutan generator yang berhasil Ojo, *et al.*, 1995.

Proses pengasutan generator induksi penguatan sendiri berlangsung antara 0,8 detik sampai dengan 1,2 detik (Mismail, 1989; Ojo, *et al.*, 1995; Bodson, *et al.*, 2012; Leicht, *et al.*, 2013).

1.1.7 Pengasutan generator induksi putaran rendah

Proses pengasutan generator induksi satu fasa penguatan sendiri putaran rendah tidak mudah (Santoso, *et al.*, 2015). Pengasutan generator harus dibantu dengan arus picu dari pelepasan energi tersimpan dari kapasitor penguat (Bodson, *et al.*, 2012; Santooso, *et al.*, 2016). Sebelum dilakukan pengasutan, rangkaian beban harus dalam kondisi terlepas agar energi yang tersimpan dalam kapasitor tidak terbuang (Santoso, *et al.*, 2016). Kapasitor penguat merupakan kapasitor yang dipasang pada terminal kumparan generator. Kapasitor penguat ini pada kondisi mantap digunakan sebagai pencatu daya reaktif yang dibutuhkan generator induksi.

Dengan adanya kapasitor penguat bertegangan awal yang besar, proses pengasutan dapat dilakukan dengan putaran sedikit lebih rendah dari putaran nominalnya (Bodson, *et al.*, 2012).

1.1.8 Pelepasan energi kapasitor sebagai pemicu

Hubungan generator dengan kapasitor penguat pada awal pengasutan, setara dengan rangkaian listrik resistansi, induktansi, dan kapasitansi yang terhubung seri tertutup. Saat pelepasan energi kapasitor terjadi aliran arus. Arus yang mengalir bukan karena sumber tegangan tetapi karena pelepasan energi tersimpan pada kapasitor. Oleh karena itu arus

akan mengalami redaman hingga habis karena energi terbuang di resistansi (Grantham, *et al.*, 1989).

Pada awal pengasutan, arus awal hasil pelepasan energi kapasitor harus cukup memenuhi kebutuhan penguatan generator, minimum sama dengan arus generator tanpa beban. Yang dimaksud arus awal adalah arus yang mengalir ketika pertama kali energi kapasitor lepas (Rogdakis, *et al.*, 2012). Untuk proses pengasutan, nilai kapasitor yang digunakan harus di atas kebutuhan penguatan generator tanpa beban dan di bawah kebutuhan beban penuh (Hanafy, *et al.*, 2008; Boora, 2009; Santoso, *et al.*, 2016).

Pada proses pengasutan, ketika generator bertegangan, sering kali putaran turun dan tegangan tidak dapat mencapai nominalnya. Tegangan dapat berlanjut sepanjang arus kemagnetannya mencukupi kebutuhan penguatan generator tanpa beban.. Bila penurunan putaran diikuti penurunan tegangan dan arus sampai tidak mencukupi untuk kemagnetan, maka akan terjadi kehilangan tegangan (Ojo, *et al.*, 1995; Bodson, *et al.*, 2012).

Pada awal proses pengasutan, terjadi peralihan dari arus picu ke arus generator. Di samping itu juga terjadi peralihan dari tegangan picu ke tegangan generator. Lama waktu peralihan antara 0,04 detik hingga 0,08 detik (Rogdakis, *et al.*, 2012). Untuk itu harus diperhitungkan penyusutan amplitudo arus pemicunya. Dalam hal ini harus diperhitungkan nilai-nilai impedansi kumparan generator, kapasitansi kapasitor penguat dan tegangan awal kapasitor.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang permasalahan di atas, yakni masih banyak rumah tangga pedesaan terutama di luar pulau Jawa belum berlistrik. Di pedesaan banyak ditemukan sumber energi terbarukan terutama air dan angin yang belum dimanfaatkan secara optimal. Adanya peluang pembangunan pembangkit listrik yang memanfaatkan potensi setempat. Masih jarang pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan generator induksi dengan putaran rendah. Sedangkan pengasutan generator induksi satu fasa penguatan sendiri daya rendah putaran rendah sering kali gagal, maka perlu dilakukan penelitian untuk memberikan pemecahan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana teknik yang perlu dilakukan agar mendapatkan generator induksi satu fasa penguatan sendiri daya rendah putaran rendah?
2. Seberapa besar pengaruh impedansi kumparan terhadap keberhasilan pengasutan generator?

3. Berapa besar tegangan awal kapasitor yang mencukupi agar proses pengasutan generator induksi satu fasa penguatan sendiri daya rendah putaran rendah dapat berhasil?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan:

1. Generator induksi satu fasa penguatan sendiri daya rendah putaran rendah yang mudah diadopsi.
2. Hubungan impedansi kumparan stator terhadap pengasutan, dan kriteria keberhasilan pengasutan generator induksi satu fasa penguatan sendiri daya rendah putaran rendah.