

SISTEM WIND-DIESEL UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK DI LOKASI DENGAN KECEPATAN - ANGIN MENENGAH DI INDONESIA

Sahat Pakpahan
Peneliti Pusat Teknologi Dirgantara Terapan, LAPAN

ABSTRACT

Windspeed is used as a reference in utilization of windturbine as a generating system and will be the main variable for calculation of the energy produced at a certain location. Windspeeds are classified in small scale, medium and large scales. Applications of small scales are generally in the stand-alone mode, while the large systems are intended for interconnection into the utility grid. In between, there are medium scale applications with the annual average windspeed of 4.0 m/s - 5.0 m/s. Example of applications are hybrid of windturbine with local diesel generating sets, known as wind-diesel system using one or more windturbines of the size of 10 kW -100 kW and to be matched with the capacity of the existing diesel. Most applications are in the intermittent mode of operation in order to obtain higher fuel saving which is used to operate the diesel. Some configurations, selection of components, modelling and calculations are presented to identify more detailed behaviour of the system.

ABSTRAK

Kecepatan angin merupakan acuan dalam pemanfaatan turbin angin sebagai pembangkit listrik dan merupakan variabel utama untuk perhitungan energi aktual di suatu lokasi. Kecepatan angin dikelompokkan dalam skala kecil, menengah atau besar. Pemanfaatan skala kecil pada umumnya adalah dalam modus berdiri sendiri, sedangkan skala besar ditujukan untuk interkoneksi ke jaringan umum/PLN setempat. Pemanfaatan skala menengah dengan kecepatan angin rata-rata tahunan dari 4,0-5,0 m/s adalah antara skala kecil dan besar, contoh aplikasinya adalah hibrida turbin angin dan pembangkit diesel yang disebut sistem *wind-diesel*. Sistem terdiri dari satu atau lebih turbin angin dengan kapasitas 10 kW-100 kW disesuaikan dengan kapasitas genset yang ada. Sistem yang banyak digunakan adalah yang bekerja secara bergantian guna memperoleh penghematan bahan bakar yang lebih besar untuk pengoperasian genset. Konfigurasi, analisis pemilihan komponen, pemodelan dan perhitungan disajikan dalam makalah ini guna mengetahui lebih rinci mengenai sifat-sifat sistem.

Kata kunci: *Angin-diesel, Modus bergantian, Penghematan bahan bakar*

I PENDAHULUAN

Energi baru dan terbarukan (EBT) merupakan sumber-sumber potensial untuk penyediaan listrik di berbagai wilayah di Indonesia yang sekarang ini peranannya makin ditingkatkan sehubungan dengan meningkatnya kebutuhan energi bagi masyarakat dan cadangan sumber energi konvensional yang makin berkurang. Sumber-sumber EBT yang akan dikembangkan mencakup energi angin, surya, mikro hidro, dan biodiesel,

dan lain-lain yang dalam program implementasinya juga telah di dukung oleh berbagai kebijakan pemerintah dalam bidang energi termasuk energi angin sehingga kontribusinya akan meningkat. Diharapkan, hingga tahun 2025 kontribusi EBT dapat mencapai 5% dari pasokan listrik nasional.

Dalam bidang energi angin, berbagai aplikasi skala kecil khususnya untuk listrik pedesaan telah dikembangkan, sedangkan dalam skala yang lebih

besar yaitu skala menengah dan besar telah dilakukan berbagai kajian dan program pengembangan lanjut untuk pemanfaatan yang lebih ekonomis sebagai pemasok listrik terutama interkoneksi dengan jaringan listrik umum setempat (PLN). Secara teknis, pengertian skala kecil adalah pemanfaatan turbin-turbin angin sampai kapasitas 10 kW terpasang per unit dengan kecepatan angin rata-rata 2,5 - 4,0 m/s di lokasi, skala menengah dari 10 kW - 100 kW dengan kecepatan angin rata-rata 4,0 - 5,0 m/s, sedangkan skala besar adalah turbin angin kapasitas di atas 100 kW dengan kecepatan angin rata-rata tahunan di atas 5,0 m/s. Skala besar digunakan untuk interkoneksi dengan jaringan listrik umum setempat yakni PLN. Salah satu aplikasi skala menengah adalah sistem pembangkit yang menggabungkan turbin angin dengan pembangkit listrik diesel setempat (PLTD) dan disebut sistem *wind-diesel*

Sistem *wind-diesel* adalah suatu sistem pembangkit listrik yang terdiri atas satu atau lebih turbin angin digabungkan dengan satu atau lebih generator diesel (disebut *genset*) yang dihubungkan secara paralel untuk pemasokan listrik secara bergantian dan bekerja otomatis. Pada waktu angin tinggi, turbin angin akan lebih banyak memasok listrik ke konsumen, sedangkan pada waktu angin rendah, pemasokan listrik akan di alihkan secara otomatis ke pembangkit diesel (*genset*) yang ada. Dibandingkan dengan skala besar yang di interkoneksi ke jaringan listrik PLN, pembangkit turbin angin dalam sistem interkoneksi menjual listrik ke PLN; sedangkan dengan sistem *wind-diesel*, listrik untuk konsumen di pasok secara bergantian oleh turbin angin dan *genset*. Tujuannya adalah penghematan bahan-bakar solar untuk mengoperasikan *genset*, dan porsi penghematannya bergantung pada potensi energi angin yang tersedia di lokasi dan permintaan [*demand*]. Dari aspek teknis, sistem ini termasuk dalam skala menengah yang menggunakan turbin angin sampai 100 kW per unit terpasang.

Sistem *wind-diesel* telah dikembangkan di berbagai negara antara lain Norwegia, Inggris, Amerika Serikat, dan lain-lain. Untuk Indonesia, prospek pemanfaatan yang telah diidentifikasi antara lain adalah di wilayah NTT dan Sulawesi Selatan dengan kecepatan angin rata-rata tahunan sebesar 4,0 - 6,0 m/s.

2 KONFIGURASI DAN SISTEM OPERASI

Konfigurasi utama sebuah pembangkit *wind-diesel* terdiri atas turbin angin, generator-diesel (*genset*) dan unit kontrol antara turbin angin dan *genset* yang berfungsi untuk mengontrol pengalihan pasokan listrik ke konsumen dari turbin angin ke *genset* dan dari *genset* ke turbin angin yang pada dasarnya di rancang secara otomatis. Konfigurasi utama pembangkit *wind-diesel* terdiri dari:

a. Turbin Angin

Sebuah turbin angin terdiri dari rotor, generator, nasel, roda-gigi, unit pengarah, unit kontrol dan menara. Turbin angin merupakan pembangkit listrik yang mengubah energi angin menjadi listrik (disebut PLTB-Pembangkit Listrik tenaga Bayu/Angin) dan dapat di interkoneksi dengan generator diesel. Jumlah turbin angin bisa satu atau lebih.

b. Generator-diesel

Generator-diesel [*genset*] sebagai pembangkit utama terdiri atas motor diesel yang selanjutnya di sebut mesin diesel, dan generatornya sendiri. Mesin diesel berfungsi untuk mengubah bahan bakar solar menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros dan selanjutnya dengan menggandengkan poros tersebut ke poros sebuah generator, maka generator akan menghasilkan listrik. Gabungan antara mesin diesel dan generatornya di sebut generator diesel (*genset*). Untuk mempertahankan daya bermanfaat, generator dilengkapi dengan *governor* yang mengatur kecepatan putaran mesin diesel dan frekuensi tegangan yang di hasilkan. Jumlah *genset* sebagai sub-

sistem *wind-diesel* juga bisa satu atau lebih.

Mesin diesel sebagai bagian dari sebuah *genset*, dikelompokkan menurut beberapa kriteria yakni berdasarkan tipe bahan bakar yang digunakan, kecepatan mesin, bentuk aspirasi dan siklus operasi.

Pemilihan bahan bakar bergantung pada harga/biaya, ketersediaan, nilai kalori, kondisi temperatur dan ciri spesifik mesin, dan umumnya pemakaian bahan bakar tersebut mencakup 80 % dari biaya operasi *genset*.

Bentuk aspirasi mesin diesel adalah *natural* atau *turbo charged*. Dalam tipe *natural*, udara diambil pada tekanan atmosfer; sedangkan pada tipe *turbo charged*, campuran udara dan bahan bakar diinjeksikan ke dalam silinder mesin pada tekanan yang lebih besar daripada tekanan atmosfer. Tipe *turbo charged* secara signifikan akan meningkatkan kapasitas mesin (sampai 40%) dan efisiensi dengan membolehkan pertambahan volume udara yang memasuki ruang pembakaran guna menjamin pembakaran bahan bakar yang lebih baik dan efisien.

Siklus operasi mesin diesel adalah 2-tak (*2-strokes*) atau 4-tak (*4-strokes*). Dalam mesin 4 tak, semua siklus pembakaran yang terdiri dari induksi, kompresi, ekspansi daya dan pembuangan (*exhaust*) terjadi pada langkah torak yang terpisah; sedangkan dalam *2-tak*, induksi dan pembuangan terjadi bila torak hampir berhenti (*stasioner*) pada akhir langkah ekspansi. Dimensi mesin 2-tak cenderung menjadi sangat besar atau sebaliknya sangat kecil.

Metoda pendinginan dapat berupa pendinginan udara, udara yang di mampatkan atau pendinginan dengan cairan.

Kecepatan sebuah mesin diesel biasanya terkait dengan ukurannya. Mesin besar cenderung beroperasi pada putaran yang lebih rendah yaitu di bawah 900 rpm, sedangkan mesin-mesin kecil hingga medium pada putaran yang lebih tinggi dari 900 rpm yaitu 1200 rpm, 1500 rpm, 1800 rpm, 2400 rpm, 3000 rpm atau

3600 rpm. Hal ini sesuai dengan putaran normal generator komersial.

Untuk pengontrolan kecepatan generator-diesel yaitu frekuensi generator, digunakan *governor* yang dapat berupa peralatan mekanik ataupun elektronik. *Governor* mekanik dipakai untuk kapasitas di bawah 500 kW atau bila beban terbagi dapat berfluktuasi sebesar + 5 sampai 10 %, sedangkan *governor* elektronik di gunakan untuk stabilitas frekuensi yang lebih teliti atau dalam operasi paralel yang otomatis. Beban-beban biasanya di kelola dalam batas $\pm 5\%$.

Nilai kalori bahan bakar yang dapat di ubah menjadi daya mekanis hanya mencapai 30% - 40%; sedangkan energi lainnya di ubah menjadi panas yang sebagian besar dipindahkan oleh pendinginan di dalam radiator, di buang dalam gas-gas pembakaran temperatur tinggi, atau di radiasi dari permukaan mesin. Untuk tipe *natural* dan *turbo charged*, hal ini diperlihatkan pada Tabel 2-i.

Tabel2-1: KESETIMBANGAN PANAS DALAM MESIN DIESEL (%)

	Turbo	Tanpa Turbo
Daya bermanfaat	33,3	35,0
Kehilangan panas dalam:	39,5	30,0
-selubung air		
-oli		
-intercooler		
Pembuangan (<i>exhaust</i>)	20,0	28,0
Radiasi	7,5	7,0
Total	100	100

Beberapa pabrikan merekomendasikan agar diesel tidak di operasikan pada kapasitas di bawah sebagian beban tertentu dalam suatu perioda yang lebih lama, dan nilai ambang yang disarankan adalah 40% walaupun 20-30%) seharusnya lebih umum untuk mesin-mesin diesel yang lebih baru. Salah satu alasannya adalah karena pada waktu tidak beroperasi, sebuah *genset* bahkan akan mengkonsumsi bahan bakar yang cukup apresiatif yaitu 20-30% dari beban penuh-

nya. Namun hal ini tidak menyiratkan bahwa pembebanan rendah tidak dapat di toleransi untuk perioda yang singkat, karena telah terbukti bahwa sebuah *genset* dapat mengakomodasikan beban-beban negatif hingga 30% dari *output* nominalnya. Konsumsi bahan bakar dalam daerah negatif terus menurun bila jumlah beban negatif yang tersambung lebih banyak dan frekuensi sistem umumnya adalah stabil selama beban negatif tersebut tidak melebihi 30% dari nominalnya. Namun dalam hal ini, ditekankan agar beban-beban negatif hanya digunakan untuk perioda yang singkat.

Generator untuk *genset* adalah generator sinkron ataupun asinkron/ induksi. Generator sinkron memiliki penguatan sendiri (*self-excitation*) dan memberikan persyaratan daya reaktif, sedangkan generator induksi harus memperoleh arus magnetisasi dari sumber luar. Oleh karena itu, secara tipikal generator induksi tidak digunakan untuk operasi terisolir yang independen. Generator arus searah juga dapat digunakan tetapi tidak banyak tersedia di pasaran. Pilihan yang paling umum adalah generator sinkron.

c. Unit penyimpanan (bila diperlukan)

Untuk sistem *otonomus* tanpa unit penyimpanan, terdapat dua jenis modus operasi yaitu :

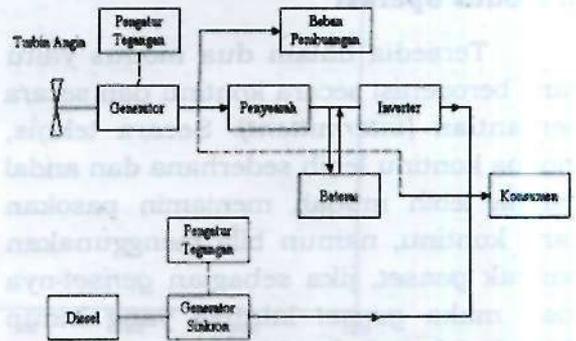
- Jika daya angin lebih kecil daripada permintaan (*load demand*), maka generator sinkron *genset* digerakkan oleh motor diesel dan menghasilkan daya listrik. Jika efisiensi generator adalah r dengan $0 < r < 1$ dan faktor daya minimum adalah $\cos \theta$ ($0 < \cos \theta < 1$), maka daya nyata generator paling sedikit sebesar $T/\cos \theta$ dari daya diesel nominal. Suatu contoh adalah memilih daya nominal *genset* sebesar 60 kW dan untuk turbin angin 25 kW. Dengan modus operasi ini, *genset* dapat memenuhi semua fungsi pengontrolan.

d. Unit Kontrol

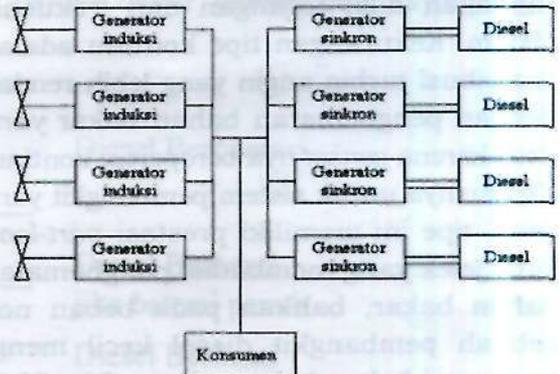
Berfungsi sebagai antar-muka/*interface* antara PLTB dan PLTD guna

mengontrol pasokan listrik pada kondisi-kondisi yang telah dirancang yaitu pada saat angin tinggi maupun pada saat angin rendah.

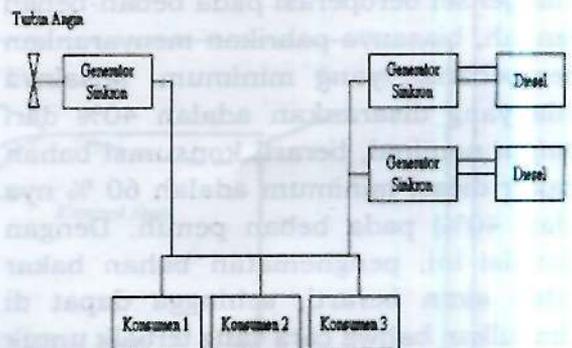
Beberapa konfigurasi *wind-diesel* di perlihatkan pada Gambar 2-1, 2-2 dan 2-3.



Gambar 2-1: Konfigurasi umum sistem *wind diesel*



Gambar 2-2: Sistem *wind diesel* dengan banyak turbin dan *genset*



Gambar 2-3: Sistem Diesel dengan Prioritas Konsumen

3 PEMILIHAN KOMPONEN

3.1 Modus Operasi *Genset*

Persyaratan utama untuk merancang suatu pembangkit *wind-diesel* yang

efektif dan viabel secara ekonomis adalah tersedianya data dan karakteristik rejim angin yang rinci di lokasi (minimal 1 lahun) serta pola pemanfaatan dan permintaan yang direncanakan. Pada dasarnya sistem rancangan mencakup beberapa hal berikut:

a. Modus operas!

Tersedia dalam dua modus yaitu yang beroperasi secara kontinu dan secara bergantian [*intermittent*]. Secara teknis, modus kontinu lebih sederhana dan andal karena lebih mudah menjamin pasokan yang kontinu, namun bila menggunakan banyak *genset*, jika sebagian *genset-nya* mati maka *genset* lainnya yang hidup tidak boleh terbebani lebih. *Genset* yang di lengkapi dengan beban pembuangan [*dump-load*] umumnya mampu mempertahankan nilai tegangan dan frekuensi sistem. Kekurangan tipe kontinu adalah kontribusi turbin angin yang lebih rendah dengan penghematan bahan bakar yang kecil karena *genset-nya* beroperasi kontinu. Khususnya untuk sistem pembangkit yang kecil, tipe ini memiliki prestasi *part-load* yang jelek yang membatasi penghematan bahan bakar, bahkan pada beban nol, sebuah pembangkit diesel kecil mengkonsumsi bahan bakar sebesar 20 - 30 % dari beban penuhnya. Selain itu, untuk menghindari efek kerusakan yang terjadi bila *genset* beroperasi pada beban-beban rendah, biasanya pabrikan menyarankan pembebanan yang minimum. Misalnya bila yang disarankan adalah 40% dari *output* nominal, berarti konsumsi bahan bakar diesel minimum adalah 60 % nya (dari 40%) pada beban penuh. Dengan kondisi ini, penghematan bahan bakar tidak akan berarti, sehingga dapat di simpulkan bahwa cara yang terbaik untuk meningkatkan penghematan bahan bakar adalah mematikan *genset* bila tidak di perlukan.

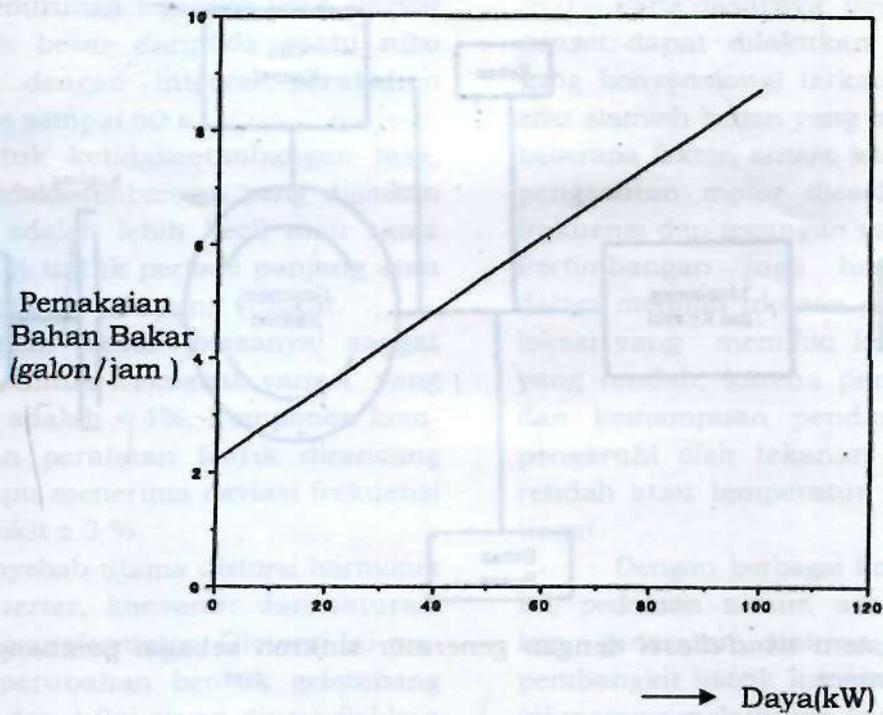
Hubungan antara pemakaian bahan bakar dan daya yang dihasilkan diperlihatkan pada Gambar 3-1.

Pada tipe bergantian, tujuan utama adalah penghematan bahan bakar yang lebih besar dengan cara mengoperasikan

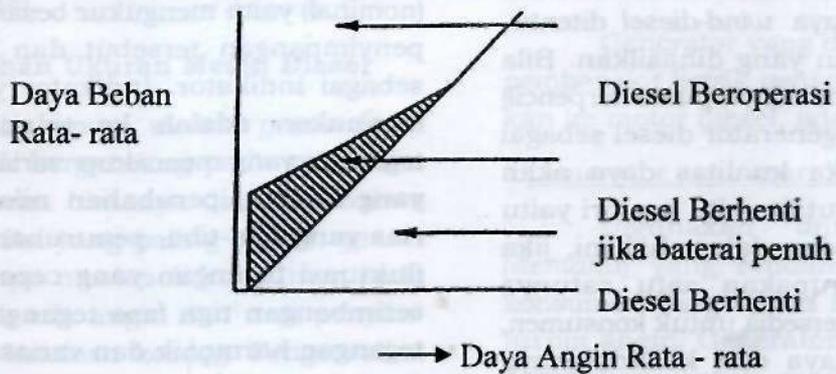
genset hanya pada waktu angin rendah atau pada saat permintaan [*demand*] tinggi, namun konsekuensinya adalah strategi kontrol yang lebih rumit. Untuk sistem tanpa unit penyimpan, hal ini menyangkut pengalihan pasokan listrik dari turbin angin ke *genset* bilamana surplus turbin angin ke beban turun di bawah suatu batas yang aman untuk memperhitungkan fluktuasi yang diakibatkan oleh turbulensi angin. Dalam praktiknya, pendekatan ini menghasilkan diesel yang berputar selama perioda yang di perpanjang bila *output-nya* ternyata tidak di perlukan. Diesel dapat dibiarkan mati [*offl*] sampai waktu yang di perlukan untuk menggantikan pengurangan energi, hanya bila sistem dilengkapi dengan unit penyimpan energi atau menerapkan roanajemen pembebanan yang tepat.

Jumlah siklus hidup-mati [*on/off*] *genset* yang di ijinan yang dapat di toleransi bergantung pada tipe mesin diesel dan cara pengasutannya [*starting*]. Penambahan kapasitas unit penyimpan akan mengurangi laju siklus dan bergantung pada rugi-rugi (tosses) yang tercakup dalam unit penyimpan yang lebih besar, maka secara marginal pengurangan bahan bakar dapat di harapkan. Dalam proses rancangan, biaya tambahan untuk unit penyimpan harus dikompromikan terhadap penghematan bahan bakar yang direncanakan dan juga terhadap keuntungan ekonomis akibat pengurangan operasi atau penurunan siklus *genset/diesel* tersebut.

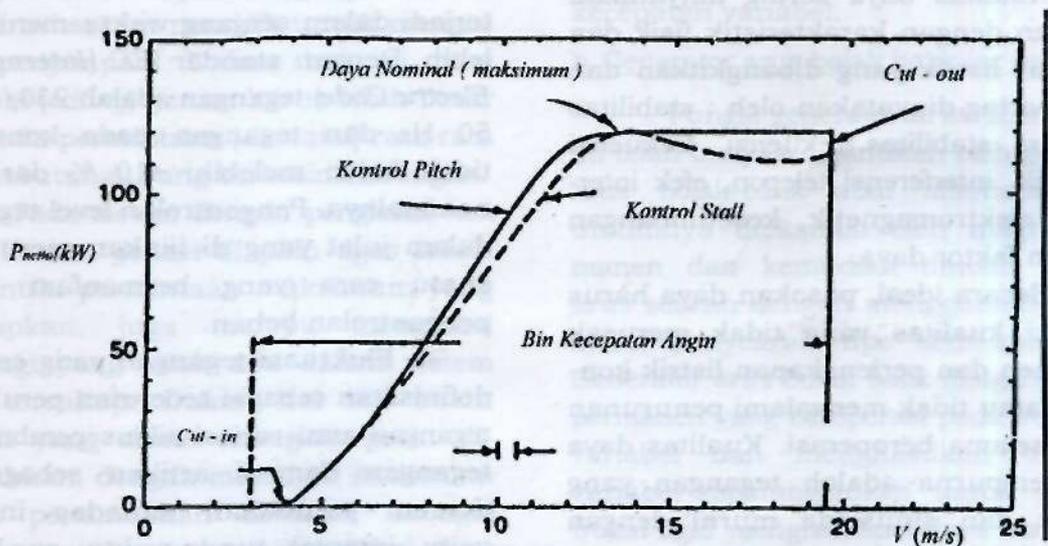
Pengurangan siklus *genset* juga dimungkinkan dengan menggunakan unit kontrol, namun, cara ini cenderung akan menghasilkan penambahan konsumsi bahan bakar. Dengan demikian, guna memperoleh sistem yang optimum, ketentuan khusus yang harus dilakukan adalah menetapkan perlu tidaknya unit penyimpan, modus operasi yang akan di gunakan, dan nilai nilai [*rating*] masing masing elemen sistem. Filosofi penggunaan *genset* untuk daya beban dan daya turbin angin tertentu diperlihatkan pada Gambar 3-2.



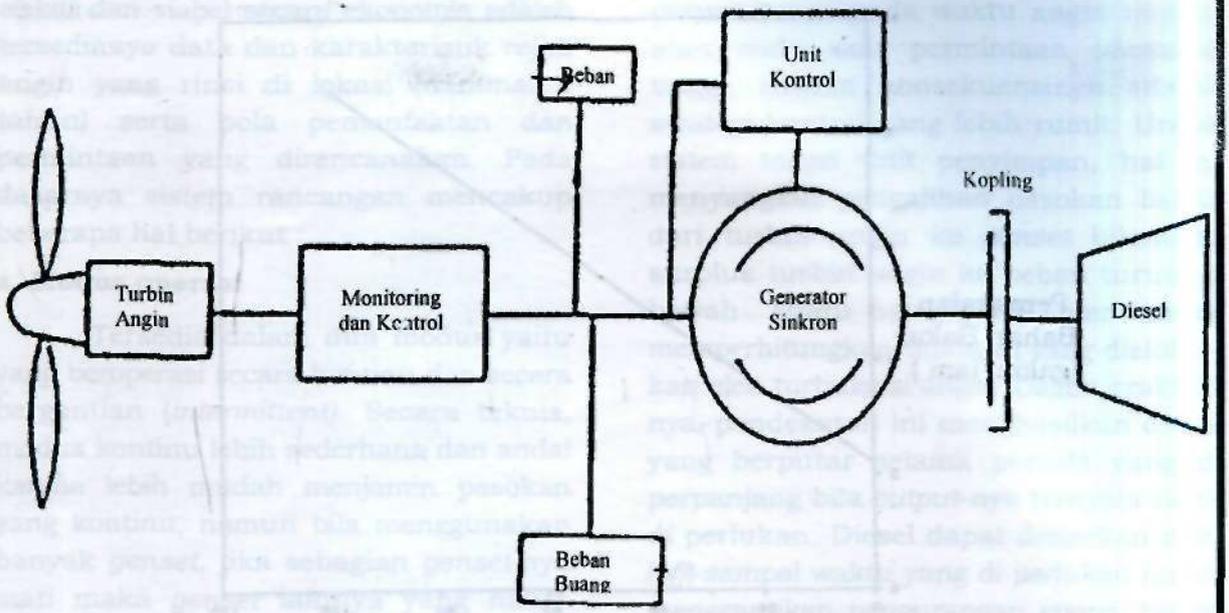
Gambar 3-1: Hubungan antara pemakaian bahan bakar genset dan daya yang dihasilkan



Gambar 3-2: Filosofi penggunaan genset



Gambar 3-3: Karakteristik daya turbin angin



Gambar 3-4: Sistem *wind-diesel* dengan generator sinkron sebagai pembangkit listrik *genset*

b. Kualitas daya

Kualitas daya *wind-diesel* ditentukan oleh pasokan yang dihasilkan. Bila utilitas di lokasi (misalnya pulau terpencil) memiliki banyak generator diesel sebagai pembangkit, maka kualitas daya akan ditentukan oleh utilitas itu sendiri yaitu *genset* tersebut, dan dalam hal ini, jika *wind diesel* merupakan satu satunya pembangkit yang tersedia untuk konsumen, maka kualitas daya dan keandalannya perlu dikaji secara lebih cermat.

Kualitas daya sering dinyatakan berkenaan dengan karakteristik fisik dan sifat-sifat listrik yang dibangkitkan dan paling sering dinyatakan oleh : stabilitas tegangan, stabilitas frekuensi, frekuensi harmonik, interferensi telepon, efek interferensi elektromagnetik, kesetimbangan fasa dan faktor daya.

Secara ideal, pasokan daya harus memiliki kualitas yang tidak merusak komponen dan perlengkapan listrik konsumen atau tidak mengalami penurunan fungsi selama beroperasi. Kualitas daya yang sempurna adalah tegangan yang kontinu dan sinusoida murni dengan amplitudo dan frekuensi yang konstan, namun karena dalam prakteknya hal ini tidak mungkin terjadi, maka digunakan suatu cara penilaian berdasarkan peng-

ukuran penyimpangan dari kondisi ideal (nominal) yaitu mengukur besarnya tingkat penyimpangan tersebut dan digunakan sebagai indikator. Indikator yang dapat digunakan adalah ke tidak teraturan tegangan yang mencakup: variasi tegangan yang lambat, perubahan nilai tegangan rms yang tiba-tiba, penurunan tegangan, fluktuasi tegangan yang cepat, ke tidak setimbangan tiga fasa tegangan, distorsi tegangan harmonik dan variasi frekuensi. Variasi tegangan yang lambat didefinisikan sebagai perubahan nilai rms yang terjadi dalam senjang waktu menit atau lebih. Dengan standar IEC (*International Electric Code*) tegangan adalah 230/400 V, 50 Hz dan tegangan pada konsumen tidak boleh melebihi $\pm 10\%$ dari nilai nominalnya. Pengontrolan level tegangan dalam julat yang di ijinakan merupakan suatu cara yang bermanfaat untuk pengontrolan beban.

Fluktuasi tegangan yang cepat di definisikan sebagai sederetan perubahan tegangan atau variasi siklus pembungkus tegangan dan di artikan sebagai sederetan perubahan terhadap interval, yaitu interval tunda-waktu awal satu perubahan tegangan ke awal yang lain yang lebih singkat daripada 1 atau 2 menit. Penurunan tegangan di definisikan

sebagai penurunan tegangan yang singkat yang lebih besar daripada suatu nilai minimum dengan interval perubahan dari 10 ms sampai 60 s.

Untuk ketidaksetimbangan fasa, faktor ketidaksetimbangan yang diijinkan oleh IEC adalah lebih kecil atau sama dengan 1 % untuk periode panjang atau 1,5 % untuk periode yang singkat.

Sistem besar biasanya sangat stabil dan untuk frekuensi, variasi yang di iijinkan adalah $< 1\%$. Komponen komponen dan peralatan listrik dirancang agar mampu menerima deviasi frekuensi paling sedikit $\pm 3\%$.

Penyebab utama distorsi harmonik adalah inverter, konverter dan saturasi magnetik transformator. Distorsi ini merupakan perubahan bentuk gelombang tegangan dan nilai yang diperbolehkan diberikan oleh standar nasional maupun internasional.

3.2 Pemilihan Ukuran Mesin Diesel

Secara umum, ukuran *genset* dapat dipilih tidak bergantung pada sistem lainnya karena biasanya dianggap bahwa dalam kondisi yang paling buruk, *genset* harus mampu memasok konsumen pada waktu tidak ada angin dan unit penyimpanan dalam keadaan kosong. Pengecualian utama adalah sistem yang didasarkan pada pendekatan *cycle-charge* yaitu diesel beroperasi secara periodik untuk mengisi unit penyimpanan. Dalam hal ini nilai nominal (rating) *genset* harus lebih besar dari pada permintaan [*demand*] rata rata atau kebutuhan yang berkesinambungan.

Pada sistem dengan pengisian *non c/c/e*, ukuran *genset* di pilih agar selain memenuhi permintaan maksimum yang diharapkan, juga mampu mengatasi rugi-rugi yang telah ada dalam sistem yang tercakup. Dalam hal ini, suatu margin yang aman mungkin perlu ditambahkan, dengan membuat ketentuan untuk penambahan *demand*. Sebagai contoh, untuk sistem *wind-diesel* yang baru, adalah lumrah menaikkannya secara berarti dan sering secara dramatis menambah konsumsi listrik.

Pada dasarnya, pemilihan ukuran *genset* dapat dilakukan menurut cara yang konvensional terkait dengan sifat-sifat alamiah beban yang harus mencakup beberapa faktor, antara lain: beban untuk pengasutan motor diesel, karakteristik frekuensi dan tegangan yang diperlukan. Pertimbangan juga harus dilakukan dalam memilih ukuran *genset* di lokasi-lokasi yang memiliki kerapatan udara yang rendah, karena peningkatan daya dan kemampuan pendingin dapat dipengaruhi oleh tekanan atmosfer yang rendah atau temperatur sekeliling yang tinggi.

Dengan berbagai kondisi pemilihan ini, pedoman umum adalah menggunakan generator sinkron sebagai unit pembangkit listrik karena generator tipe ini mampu melakukan berbagai fungsi.

3.3 Pemilihan Generator Untuk Genset

Generator yang digunakan sebagai pembangkit listrik *genset* yang digandengkan ke motor diesel, adalah

a. Generator arus searah (dc generator).

Digunakan untuk permintaan [*demands*] yang rendah dengan beban/konsumen yang secara fisik dekat dengan turbin angin. Generator tipe ini biasanya digunakan untuk mengisi baterai dan pemanas resistif yang beroperasi pada kecepatan variabel.

b. Generator arus bolak balik (ac generator)

Fungsi generator arus searah saat ini telah banyak digantikan oleh generator arus bolak-balik atau alternator yang umumnya dieksitasi oleh magnet permanen dan kemudian diubah menjadi arus searah dengan menggunakan rangkaian penyearah tipe semi-konduktor. Generator arus bolak balik dengan magnet permanen yang beroperasi pada kecepatan variabel dan menghasilkan tegangan variabel memungkinkan untuk pengontrolan agar menghasilkan daya maksimum pada kecepatan angin tinggi dengan menggunakan perubahan reaktansi induktif gulungan stator untuk membatasi keluaran arus.

c. Generator sinkron

Generator sinkron digandeng ke mesin diesel melalui kopling. Fungsi generator sinkron, adalah mengubah daya mekanis yang dihasilkan oleh mesin diesel menjadi listrik, memasok daya reaktif ke sistem, yaitu beban, beban pembuangan, ke turbin angin, mengontrol level tegangan jaringan, menghasilkan tegangan sinusoida yang sama dengan jaringan, menghasilkan arus hubung singkat untuk memutus sekring, melakukan komutasi *thyristor* dalam hal konverter terkomutasi jaringan dihubungkan ke jaringan, dan memasok arus masuk ke mesin induksi dalam sistem.

3.4 Pemilihan Turbin Angin

Prestasi sebuah turbin angin dinyatakan oleh kurva daya yang memberikan hubungan antara daya yang dihasilkan pada berbagai kecepatan angin dan daya bermanfaat berada antara kecepatan *cut-in* dan *cut-out*. Di atas kecepatan *cut-in* (kecepatan minimal agar turbin angin menghasilkan listrik), daya bertambah secara cepat sampai mencapai nominal (*rated speed*), dan selanjutnya dari kecepatan nominal hingga *cut-out*, daya yang dihasilkan akan dipertahankan pada nilai yang konstan yang disebut daya nominal. Pada kecepatan angin melebihi *cut-out*, daya keluaran akan dibatasi agar memproteksi kerusakan, atau menghentikan turbin angin.

Karena kecepatan dan arah angin selalu berubah, hal ini akan mengakibatkan turbulensi yaitu variasi kecepatan dan arah angin dalam waktu yang sangat singkat dalam orde beberapa detik hingga beberapa menit, dan hal ini akan mengubah daya yang dihasilkan selama interval tersebut. Akibatnya bila dibandingkan terhadap rata-rata selama suatu interval waktu misalnya 10 menit hingga 1 jam, daya sesaat kadang-kadang akan jauh lebih besar daripada nilai rata-rata dan kadang-kadang jauh lebih rendah. Hal ini merupakan faktor yang sangat penting

dalam merancang sistem *wind-diesel* yang efektif.

Di lokasi yang baik, keluaran daya jangka panjang sebuah turbin angin hanya sama hingga $\pm 30\%$ dari daya nominal generator; namun demikian, di lokasi terpencil, nilai faktor beban yang lebih rendah dari 20% masih dapat ekonomis namun sangat bergantung pada lokasi. Dengan demikian, dalam perancangan diperlukan estimasi potensi produksi energi angin di lokasi, dan juga sifat-sifat alamiah beban serta tersedianya daya guna memungkinkan memperoleh rating yang optimum. Berbagai kriteria yang digunakan untuk memilih turbin angin, adalah kapasitas/diameter rotor, posisi rotor [*up wind* atau *down wind*], jumlah sudu, tipe generator untuk turbin angin, subsistem kontrol, tipe dan tinggi menara, level tegangan dan frekuensi.

Sebuah kurva yang memperlihatkan hubungan antara daya dan kecepatan angin diperlihatkan pada Gambar 3-3.

Beberapa parameter untuk pemilihan turbin angin diperlihatkan pada Tabel 3-1.

Pemilihan tipe generator akan menghasilkan strategi pengontrolan yang berbeda. Generator magnet permanen, alternator dan generator arus searah umumnya beroperasi paralel dengan generator diesel untuk mengisi baterai dan selanjutnya memasok daya ke konsumen.

Tipe generator, konfigurasi rotor dan pengontrolan semuanya mempengaruhi variabilitas daya yang dihasilkan oleh turbin angin dan dengan demikian, harus diperhitungkan sewaktu merencanakan strategi pengontrolan. Petunjuk umum adalah bahwa nilai nominal (*rating*) turbin angin tidak secara signifikan lebih besar dari penjumlahan beban konsumen maksimum dan rugi-rugi sistem; kecuali bila sistem pembangkit dilengkapi dengan unit penyimpanan energi yang besar. Kecepatan nominal (*rated*) turbin angin secara ideal harus lebih kecil dari pada bila turbin angin tersebut diinterkoneksi dengan *grid*.

Tabel 3-1: PARAMETER UNTUK PEMILIHAN TURBIN ANGIN

Parameter pilihan	Keterangan
<i>Upwind</i> atau <i>downwind</i>	<ul style="list-style-type: none"> - menghindari turbulensi bayangan menara (+) - kebisingan rendah (+) - rotor harus dipertahankan dalam posisi <i>upwind</i> sehingga memerlukan komponen yang lebih banyak dan menjadi lebih mahal (-) - menambah beban pada menara (-)
Rotor dengan <i>pitch</i> tetap atau variabel	<ul style="list-style-type: none"> - tidak memerlukan mekanisme pengontrolan <i>pitch</i> (+) - Komponen lebih sederhana daripada tipe variabel sehingga lebih murah
Rotor kaku (<i>rigid</i>) atau dapat diarahkan (<i>teetered</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - tidak memerlukan alat menghentikan <i>teeter</i> dan bantalan <i>teeter</i> (+) - lebih murah (+) - menerima beban yang lebih besar (-)

Pengontrolan sebuah turbin angin dimaksudkan untuk mengontrol keluaran daya dan putaran (rpm) turbin angin. Sistem dengan sudut *pitch* yang berubah-ubah (*variable-pitch*) dapat mengontrol kecepatan lebih, menghentikan turbin angin dan menghasilkan pembatasan daya yang maksimum, sedangkan untuk turbin angin dengan sudut *pitch* tetap, sudu-sudu mempertahankan sudut yang sama antara garis kord dan bidang rotor sehingga dalam hal ini digunakan pengontrolan *stall* (*aerodynamic stall control*) yang dilengkapi dengan rem untuk menghentikan rotor.

3.5 Pemilihan Unit Penyimpan

Untuk sistem *wind-diesel* yang tidak bergantung pada *grid*, fungsi atau pemakaian unit penyimpan mencakup :

menghasilkan fluktuasi jangka pendek yang lembut dalam daya turbin angin dan/atau beban untuk menyempurnakan kualitas *grid*, mengurangi siklus *start/stop genset* (penyimpanan jangka pendek hingga menengah), mengurangi konsumsi daya (penyimpanan jangka pendek hingga medium), mempertahankan kesetimbangan daya turbin angin untuk jangka menengah dan panjang atau surplus beban konsumen (penyimpanan jangka panjang) dan meminimumkan waktu *start-up* diesel yang berarti memperpanjang waktu diam/*stand-still* mesin diesel (penyimpanan jangka pendek). Berbagai tipe unit penyimpan yang digunakan adalah: baterai, *flywheel*, *hydraulic pressure vessels* dan hidro. Tipe baterai yang digunakan adalah Asam Timbal (Lead Acid), Nikel Kadmium dan Sodium Sulfur dengan kelebihan dan kekurangan masing masing.

3.6 Unit Kontrol

Sebuah *genset* pada dasarnya telah dilengkapi dengan *governor* untuk mengatur kecepatan, urutan pengasutan, proteksi dan pengaturan tegangan. Demikian juga turbin angin guna mengontrol penyambungan dan pemutusan daya ke sebuah jaringan dan dalam beberapa hal melakukan pengontrolan daya. Dengan demikian, sebagai bagian sistem *wind-diesel*, kelengkapan sistem kontrol tersebut harus memungkinkan untuk dioperasikan dalam sistem walaupun beberapa modifikasi mungkin diperlukan misalnya untuk pembatasan frekuensi dan tegangan yang lebih teliti. Dua hal penting yang harus diperhatikan dalam merancang sistem kontrol adalah: Pertama, pengontrolan frekuensi dengan cara surplus daya dan bila diesel memerlukan pembebanan minimum.

Hal ini biasanya diperoleh dengan menggunakan *dump-load* atau elemen penyimpan yang dikontrol agar menghasilkan kesetimbangan daya.

Pengontrolan cara ini didasarkan pada daya atau frekuensi yang terukur atau keduanya dan memiliki peranan kritis terkait dengan stabilitas sistem.

Kedua, menghidupkan dan mematikan diesel. Dalam prakteknya terdapat kendala untuk mencegah siklus *off/on* yang berlebih dan kondisi ini akan bervariasi bergantung pada lokasi khususnya intensitas turbulensi.

Untuk sistem dengan unit penyimpanan misalnya minimal yang dapat mencakup beban sementara diesel dihidupkan, maka keputusan untuk menghidupkan diesel dapat diambil berdasarkan frekuensi minimum yang dapat diterima, sedangkan yang paling rumit adalah keputusan untuk mematikan diesel. Sejumlah kondisi berbeda didasarkan pada:

- Waktu minimum diesel untuk beroperasi. Misalnya diesel harus beroperasi paling sedikit selama waktu yang telah di setel sejak diesel tersebut dihidupkan sampai berhenti kembali;
- Surplus daya yang dibutuhkan;
- Perataan atau penapisan (*filtering*) surplus daya angin.

Dalam prakteknya, ketiga hal tersebut dapat digabungkan.

3.7 Keselamatan Konsumen

Sistem *wind-diesel* harus memenuhi persyaratan standar untuk keselamatan konsumen, penduduk maupun operator. Beberapa contoh adalah :

- Integrasi PLTB ke jaringan PLTD kecil dilakukan oleh pengembang independen.
- Integrasi dilakukan oleh utilitas sendiri, atau.
- Membangun suatu pembangkit *wind-diesel* yang baru di daerah yang belum digunakan.

3.8 Manajemen Beban

Masalah variabilitas daya angin pada dasarnya dapat di atasi dengan pengontrolan beban daripada mengupayakan penyesuaian pembangkitan daya ke konsumen dengan menambahkan unit penyimpanan.

Pendekatan lain adalah menghubungkan beban secara bergantian agar sepadan dengan daya yang tersedia, akan

tetapi bila diperlukan agar sifat-sifat sistem pemasok daya benar-benar harus transparan ke konsumen akhir sebagaimana diharapkan pada *grid* yang besar, maka pengontrolan beban mungkin tidak tepat, sehingga instalasi penyangga energi atau unit penyimpanan benar-benar diperlukan. Akan tetapi tanpa penyimpanan energi yang besar untuk penetrasi angin yang signifikan, kelebihan energi harus dialihkan ke beban pembuangan (*dump-load*) walaupun umumnya menghasilkan viabilitas ekonomi yang rendah. Dalam banyak pemakaian, permintaan yang nyata tidak selalu harus terpenuhi; dan suatu cara adalah memanfaatkan daya lebih dengan baik. Dalam kenyataannya jika diberikan insentif ekonomi, banyak konsumen yang bersedia menjadwalkan kembali permintaannya (*demand*) agar sesuai dengan sistem pemasok atau mentoleransi keterbatasan pasokan. Hal ini akan memberikan fleksibilitas yang lebih baik bagi perancang.

Kunci keberhasilan pengontrolan beban terletak pada kemampuan mengelompokkan beban-beban tersebut sesuai dengan prioritas permintaan. Hal ini akan mempermudah pengontrolan hidup-mati *genset* berdasarkan prioritas tersebut.

Strategi manajemen beban di bagi dalam strategi jangka pendek dan jangka panjang. Dalam jangka pendek, pengalihan dapat terjadi dalam waktu yang sangat singkat yaitu orde milisekon.

4 PEMODELAN SISTEM

Model simulasi untuk sistem *wind-diesel* diperlukan untuk membantu rancangan teknis dan analisis ekonomi. Aplikasi selain hal tersebut adalah:

- Interpretasi semua jenis data eksperimental baik di laboratorium maupun di lokasi;
- Optimasi sistem sebelum menetapkan komponen atau perangkat keras. Hal ini akan sangat mengurangi biaya pengadaan dibandingkan dengan cara uji-coba;

- Dalam waktu singkat dapat mengidentifikasi sifat-sifat *wind-diesel* terhadap perubahan angin dan beban yang ekstrim;
- Sebagai referensi atau pembandingan terhadap pemasangan di lokasi lain yang memiliki pola angin dan beban yang berbeda;
- Mempermudah mempelajari efek pemodelan dengan menggunakan skala dimensi (*scaling*) terhadap sifat-sifat dan prestasi keseluruhan.

Model-model yang digunakan dapat berupa :

- Model deret waktu (*time series*) guna mempelajari *respons* sistem terhadap gangguan (sebagai fungsi waktu) dalam data masukan yang umumnya dijelaskan oleh sekumpulan persamaan differensial biasa dengan waktu sebagai variabel bebas;
- Model Dinamik, untuk menganalisis kualitas daya, ukuran komponen dan stabilitas sistem dalam hubungannya dengan tegangan dan frekuensi. Model dinamik juga menjelaskan transien listrik dan mekanik dan mewakili level-level rincian tertinggi karena harus mampu mensimulasikan berbagai fenomena transien dalam komponen listrik. Aplikasi lainnya adalah untuk subsistem kontrol daya/tegangan reaktif dan daya/frekuensi reaktif;
- Model prestasi jangka pendek dan jangka panjang, untuk mempelajari kesesuaian daya antara turbin angin, diesel dan beban dalam jangka pendek (sampai beberapa menit) hingga jangka panjang. Secara khusus, model jangka panjang dimaksudkan untuk menentukan prestasi sistem keseluruhan dengan sasaran utama menaksir penghematan bahan bakar dibandingkan dengan bila sistem pembangkit hanya menggunakan *genset*. Pemodelan ini mencakup turbin angin (hubungan antara daya dan kecepatan angin), *genset* (konsumsi bahan bakar sebagai data masukan dan keluaran daya yang umumnya dianggap linear atau kuadratik), penyim-

panan energi, pengalihan atau pembuangan energi dan unit kontrol.

5 SISTEM RANCANGAN

Dengan mengacu pada konfigurasi yang diperlihatkan pada Gambar 5-1, daya nyata maksimum yang dipasok oleh *genset*, adalah

$$P_d = P_1 + P_{dl} - P_w \quad (5-1)$$

$$Q_d = Q_1 + Q_{dl} + Q_w \quad (5-2)$$

Dengan P_d = daya yang dipasok oleh *genset*, P_1 = daya yang diterima oleh beban, P_{dl} = daya yang diterima oleh beban pembuangan (*dump-load*) dan P_w = daya yang dihasilkan oleh turbin angin. Dari sisi permintaan, Q_d = permintaan daya reaktif diesel, Q_1 = permintaan daya reaktif beban, Q_{dl} = permintaan daya reaktif beban-buang dan Q_w = permintaan daya reaktif turbin angin.

Jika beban-buang menggunakan *rile* pengontrol dari bahan semikonduktor, maka *rile-rile* tersebut akan *ON* atau *OFF* pada tegangan perpotongan nol (*zero crossing voltage*), sehingga permintaan daya reaktif $Q_{dl} = 0$.

Selanjutnya hubungan antara Q_w dan P_w , adalah

$$Q_w = - P \tan \alpha \quad (5-3)$$

Dan hubungan antara faktor-daya beban dengan Q_1 dan P_1 adalah,

$$Q_1 = P_1 \tan \theta \quad (5-4)$$

Dalam hal ini, α = sudut serang sudu turbin angin dan $\cos \theta$ = faktor-daya. Untuk $\cos \theta$ minimum = 0,8, maka permintaan daya reaktif maksimum (Q_1 maksimum), adalah

$$Q_1 = P_1 \tan \theta = 0,75 P_1 \quad (5-5)$$

Daya nyata (*apparent power*) maksimum (S_d) yang harus dipasok oleh *genset*, adalah

$$S_d = \sqrt{(P_d^2 + Q_d^2)} \quad (5-6)$$

dengan faktor-daya $\cos \theta = P_d/S_d$

Selanjutnya dengan memasukkan nilai Q_w dan Q_1 pada persamaan 5-3

dan 5-4 ke dalam persamaan 5-6, maka daya maksimum, adalah

$$S_d = \sqrt{(1,56 P_1^2 + 1,34 P_w^2 + P_{dl}^2 - 1,13 P_w P_1 + 2 P_1 P_{dl} - 2 P_w P_{dl})} \quad (5-7)$$

Kondisi-kondisi yang mungkin terjadi, adalah

- Jika $P_w > P_1$, maka $P_{dl} = P_w - P_1$ dan $P_d = 0$; sehingga daya maksimum menjadi

$$S_d = 0,75 P_1 + 0,58 P_w \quad (5-8)$$

$$\text{dan } \cos \theta_d = P_d / S_d = 0 \quad (5-9)$$

- Jika $P_w < P_1$, maka $P_{dl} = 0$, maka

$$S_d = \sqrt{(1,56 P_1^2 + 1,34 P_w^2 - 1,13 P_w P_1)} \quad (5-10)$$

$$\text{dan } \cos \theta_d = P_d / S_d = (P_1 - P_w) / S_d \quad (5-11)$$

Berarti bahwa daya nyata maksimum yang diperlukan (S_d) dan faktor-daya merupakan fungsi dari P_w dengan P_1 sebagai parameter.

Untuk contoh perhitungan dengan menggunakan persamaan 5-8 dan mengambil $P_w = 75$ kW, $P_1 = 50$ kW, maka diperoleh daya diesel $S_d = 81$ kW; dan jika $P_w < P_1$ dengan $P_w = 50$ kW dan $P_1 = 75$ kW, diperoleh daya diesel = 88,81 kW.

Daya nyata yang dipasok oleh generator sinkron bergantung pada faktor-daya karena pasokan daya maksimum pada tegangan terminal yang konstan terutama ditentukan oleh nilai maksimum tegangan terbuka.

6 KESIMPULAN DAN SARAN

Pemanfaatan SKEA/turbin angin dengan sistem *wind-diesel* merupakan suatu prospek yang baik di beberapa wilayah di Indonesia untuk penghematan bahan bakar yang lebih besar. Hal ini dapat dikembangkan karena sistem pembangkit di berbagai wilayah pada saat ini

banyak berupa PLTD/Diesel yang dalam operasinya membutuhkan biaya pemakaian bahan bakar yang tinggi termasuk pemeliharaan. Beberapa wilayah yang telah diidentifikasi antara lain, adalah Nusa Tenggara Timur, Sulawesi Selatan, Aceh dan Nias yang memiliki kecepatan angin rata-rata tahunan antara 4,0-7,0 m/s.

7 PENUTUP

Terima kasih diucapkan kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan data dan informasi dalam penulisan makalah ini, yaitu Pemerintah Kabupaten Kupang, Timor Tengah Selatan dan Rote di wilayah NTT, WINDGUARD, Soluziana, DJLPE dan LAPAN. Dengan informasi tersebut, analisis untuk implementasi sistem *wind-diesel* dapat didukung oleh data dan informasi yang aktual dari berbagai wilayah tersebut.

DAFTAR RUJUKAN

- AWEA, 1991. *Wind-diesel Systems Architecture Guidebook*, AWEA, Washington DS USA.
- BP Solar, 1993. *Hybrid Power System*, BP Solar.
- IEAP, 1990. *Power Performace Testing*; USA.
- Ray hunter and George Elliot, 1994. *Wind-diesel Systems'A Guide to the Technology and Its Implementation*; Cambridge Univ Press, NY USA.
- Renewable Energy Group, 1993. *Interactive Simulation of Renewable Electrical Energy Supply System (INSEL)*; Dept of Physics University of Oldenburg; Germany.
- Tim LAPAN, 1996. *Sistem Simulasi Hibrida dan Otonomous*; Putekgan LAPAN.