

BAB IV PEMBAHASAN

4.1. Data Pendukung yang Digunakan untuk Perancangan Sistem

Yang dimaksud dengan data pendukung disini adalah data yang diperlukan sebagai pendukung atau pelengkap agar perhitungan dan analisis dapat dilakukan dengan benar, sesuai dengan kondisi dan keadaan yang ada. Data pendukung juga sering disebut data sekunder, artinya bukan data utama yang didapatkan secara langsung melalui pengukuran oleh penulis, tetapi data yang diperoleh dari sumber-sumber terpercaya. Walaupun bukan yang utama, bukan berarti data-data ini tidak penting. Tanpa adanya data ini perancangan tidak mungkin dapat dilakukan. Data-data ini terdiri dari data radiasi matahari dan kecepatan angin di pulau Mandangin, data spesifikasi komponen sistem *photovoltaic* dan turbin angin yang ada di pasaran, data komponen pendukung sistem hibrida serta data bahan bakar dan karakteristik indeks bunga yang berlaku di Indonesia.

4.1.1. Data Mesin Diesel di Pulau Mandangin

Data mesin diesel di pulau Mandangin ini diperoleh dari PLN rayon Sampang, Madura. Terdapat empat mesin diesel milik PLN dan dua mesin diesel milik swasta yang berfungsi memasok listrik di pulau Mandangin. Adapun data mesin diesel milik PLN dan kemampuannya dapat dilihat pada tabel 4.1 dan tabel 4.2 di bawah.

Tabel 4.1 Data Aset PLTD Mandangin Milik PLN

Jumlah Pelanggan Prabayar	: 2360 Pelanggan
Jumlah Pelanggan Pasca Bayar	: 6 Pelanggan
Jumlah Penduduk	: 19507 Jiwa
Jumlah Kepala Keluarga	: 6736 KK
Mesin Operasi	: 1. DEUTZ F10L 413F 125 KVA no.seri 75710 2. DEUTZ F10L 413F 125 KVA no.seri 6711971 3. MERCY BENZ OM 407 125 kVA no.seri 017840 4. DEUTZ TBD 616 V 12 500 kW no.seri 2204139
Beban Puncak	: 525 kW
Jaringan Tegangan Rendah	: 6706 KMS
LV Panel	: 5 Buah
Tiang Beton	: 56 Buah
Tiang Besi	: 82 Buah
Jumlah Feeder	: 1 Jurusan JTM, 3 Jurusan JTR
Luas Wilayah	: 2.88 km ²
SFC Tahun 2012	: 0.316
Jam Operasi Tahun 2012	: 6948 jam nyala
Jam Standby	: 1.812 jam

Tabel 4.2 Data Kemampuan dan Usia PLTD Mandangin

No	Uraian	Satuan	Realisasi 2012				
			Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Total
1	Tahun Operasi	Tahun	1984	1984	1984	2010	
2	Daya Terpasang	kW	100	100	100	500	800
3	Daya Mampu	kW					
4	Rencana Produksi 2012	kWh					
5	Realisasi Produksi 2011	kWh	176.172	70.432	56232	1,136,902	1,439,738
6	Pemakaian Sendiri	kWh	0	0	0	0	0
7	Jumlah SDM / Operator *	-					
	Pegawai PLN	Orang					1
	Pegawai Lepas / Koperasi	Orang					5
8	Produktivitas **	kWh/Org					15082

Dari Tabel 4.1 terlihat bahwa PLN memiliki empat buah mesin diesel dengan dua kapasitas yang berbeda, yaitu mesin diesel berkapasitas 125 kVA dan mesin diesel berkapasitas 500 kW. Untuk mesin diesel dengan kapasitas 125 kVA ini, memiliki tahun operasi yang sama, yaitu dimulai pada tahun 1984, atau dengan kata lain mesin diesel ini sudah beroperasi selama 29 tahun. Untuk mesin diesel yang rata-rata memiliki umur hanya 25 tahun bergantung pada *O&M (Operation & Maintenance)*, mesin diesel milik PLTD Mandangin ini seharusnya tidak layak pakai dilihat dari kualitas mesin diesel yang turun akibat waktu penggunaan yang sangat lama.

4.1.2. Data Beban PLTD Mandangin

Data beban ini dibutuhkan untuk menentukan berapa besar kapasitas daya yang diperlukan untuk menggantikan peran mesin diesel yang saat ini digunakan untuk memasok beban terpasang pada pulau Mandangin. Penentuan beban mana yang akan disuplai oleh energi terbarukan dilihat dari data beban yang didapatkan dari PLTD Mandangin.

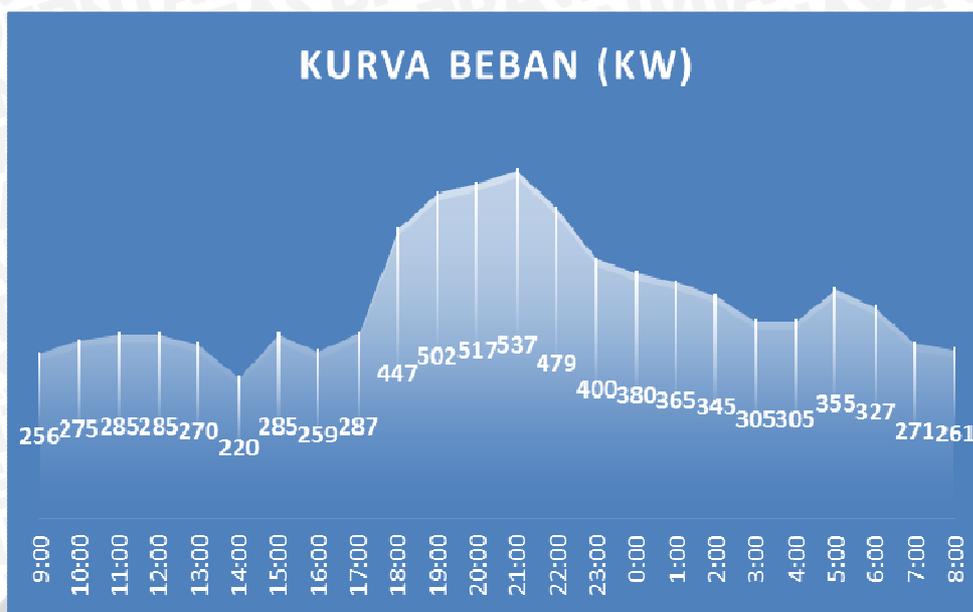
Beban yang akan dipasok oleh energi terbarukan bergantung dari besarnya dan waktu beroperasinya. Karena untuk energi terbarukan yang membutuhkan matahari sebagai sumber, hanya didapatkan pada siang hari dan sisanya hanya bisa dipasok oleh baterai yang telah *dicharging*. Berikut adalah data beban PLTD Mandangin pada tanggal 9 Agustus 2013.

Tabel 4.3 Data Beban PLTD Mandangin 9 Agustus 2013

WAKTU (perjam)	BEBAN MESIN 1 PT PLN (kW)	BEBAN MESIN 2 PT PLN (kW)	BEBAN MESIN 3 PT PLN (kW)	BEBAN MESIN 4 PT PLN (kW)	TOTAL BEBAN (kW)
9:00	MO	55	50	151	256
10:00	MO	STAND BY	45	230	275
11:00	MO	STAND BY	45	240	285
12:00	MO	STAND BY	45	240	285
13:00	MO	STAND BY	50	220	270
14:00	MO	STAND BY	STAND BY	220	220
15:00	MO	STAND BY	STAND BY	285	285
16:00	MO	STAND BY	STAND BY	259	259
17:00	MO	STAND BY	STAND BY	287	287
18:00	MO	STAND BY	65	382	447
19:00	MO	55	55	392	502
20:00	MO	55	50	412	517
21:00	MO	65	40	432	537
22:00	MO	55	STAND BY	424	479
23:00	MO	STAND BY	STAND BY	400	400
0:00	MO	STAND BY	STAND BY	380	380
1:00	MO	STAND BY	STAND BY	365	365
2:00	MO	STAND BY	STAND BY	345	345
3:00	MO	STAND BY	STAND BY	305	305
4:00	MO	STAND BY	STAND BY	305	305
5:00	MO	STAND BY	STAND BY	355	355
6:00	MO	STAND BY	STAND BY	327	327
7:00	MO	60	55	156	271
8:00	MO	60	50	151	261

Sumber : PLN Rayon Sampang.

Pada tabel 4.3 terlihat berapa daya yang dipasok oleh mesin diesel, baik milik PLN maupun milik swasta, dan mesin mana yang mengalami gangguan sehingga tidak digunakan untuk memasok beban terpasang. Terlihat pada mesin 2 dan 3 milik PLN memiliki masa *standby* yang cukup lama dibanding dengan mesin 4 milik PLN dan mesin 2 milik Swasta yang hanya beberapa jam saja. Hal ini disebabkan karena jumlah beban yang cenderung menurun dan cukup jika dipasok oleh mesin diesel lain. Sehingga pemakaian mesin diesel cenderung tidak efektif dikarenakan *starting up* mesin diesel yang cenderung membutuhkan daya lebih dan penggunaan bahan bakar yang cukup banyak. Berikut grafik beban secara umum pada pulau Mandangin.



Gambar 4.1 Grafik Beban sebagai Fungsi Waktu pada PLTD Mandangin

Terlihat pada Gambar 4.1 bahwa karakteristik beban pada pulau Mandangin mirip dengan karakteristik beban pedesaan pada umumnya. Dengan beban dasar yang cenderung sama dan mulai naik pada saat menjelang malam hari. Beban terendah pada pulau Mandangin terdapat pada pukul 14.00 sebesar 220 kW dan beban tertinggi terletak pada pukul 21.00 yaitu sebesar 537 kW.

4.1.3. Data Radiasi Matahari dan Kecepatan Angin di Pulau Mandangin

Data radiasi matahari dan kecepatan angin diperoleh hasil pengukuran menggunakan alat yang disebut *Gun-Bellany* (alat pengukur radiasi matahari) dan anemometer. Untuk radiasi matahari, data yang diambil berupa data harian, diukur dengan melihat ketinggian air hasil penguapan akibat radiasi matahari yang tertampung dalam suatu tabung tertutup dalam satu hari. Besarnya ketinggian dalam millimeter tersebut selanjutnya dikalikan dengan koefisien alat (pada alat yang digunakan besarnya 20,8) sehingga diperoleh data radiasi dalam kWh/m². Selanjutnya data harian yang sudah terkumpul selama satu bulan diambil nilai rata-rata nya sehingga diperoleh besar energi radiasi matahari rata-rata harian dalam satu bulan.

HOMER memiliki fitur yang memudahkan pengguna untuk mendapatkan data radiasi matahari dan kecepatan angin dan menghubungkannya pada website resmi NASA eosweb.larc.nasa.gov dengan memasukkan koordinat wilayah yang diinginkan. Pulau Mandangin terletak pada koordinat 7° 18' 37.63" LS dan 113° 12' 44.93" BT. Pengukuran juga dilakukan secara manual, menggunakan alat pengukur radiasi matahari, solar meter, dan alat pengukur kecepatan angin.



Gambar 4.2



Gambar 4.3

Gambar 4.2 dan gambar 4.3 menunjukkan pengukuran secara manual yang dilakukan di pesisir pantai. Pengukuran dilakukan kurang lebih selama satu jam, yaitu pada pukul 13.00 sampai 14.00. Pengukuran manual ini melihat posisi matahari yang berada tepat di atas dan cuaca yang cerah, sehingga diharapkan mendapat hasil pengukuran yang maksimal.

Karena yang dibutuhkan adalah data radiasi matahari dan kecepatan angin perbulan selama satu tahun, maka hasil pengukuran manual dibandingkan dengan bulan yang sama dengan data yang didapat dari website *eosweb.larc.nasa.gov*, yaitu pada bulan Agustus, hasil tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, dan didapatkan data radiasi matahari dan kecepatan angin selama satu tahun sebagai berikut.

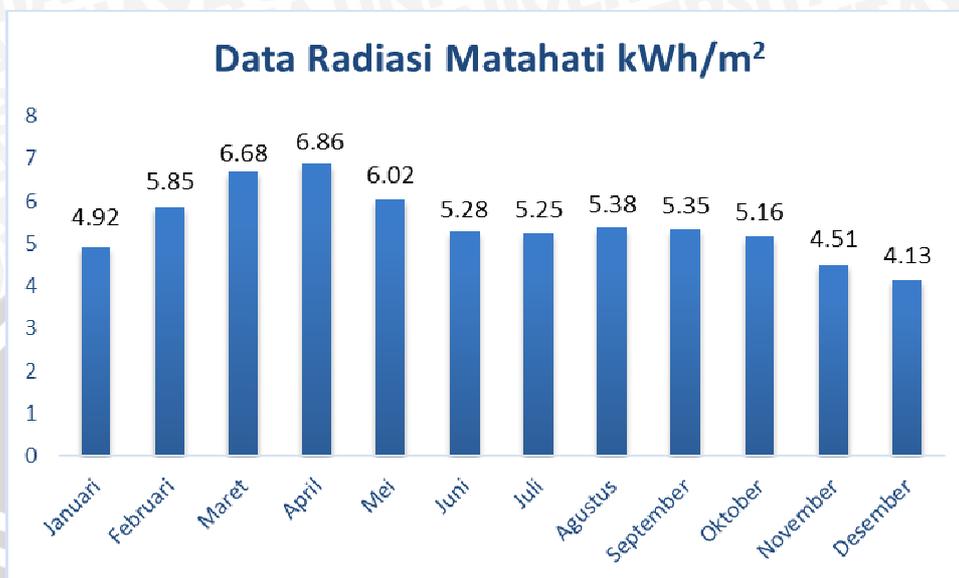
Tabel 4.3 Data Radiasi Matahari dan Kecepatan Angin Pulau Mandangin

Bulan	Radiasi Matahari	Kecepatan angin
	kWh/m ²	m/s
Januari	4,92	6,35
Februari	5,85	5,41
Maret	6,68	4,68
April	6,86	3,28
Mei	6,02	2,68
Juni	5,28	4,87
Juli	5,25	4,45
Agustus	5,38	5,34
September	5,35	4,30
Oktober	5,16	4,16
November	4,51	4,49

Bulan	Radiasi Matahari	Kecepatan angin
	kWh/m ²	m/s
Desember	4,13	5,63

Sumber : *eosweb.larc.nasa.gov*

Atau juga dapat dinyatakan dalam bentuk grafik berikut.



Gambar 4.4 Grafik Radiasi Matahari di Pulau Mandangin

Sumber : *eosweb.larc.nasa.gov*



Gambar 4.5 Grafik Kecepatan Angin di Pulau Mandangin

Sumber : *eosweb.larc.nasa.gov*

Dari Gambar 4.1 diketahui bahwa pulau Mandangin memiliki tingkat radiasi matahari yang bervariasi. Namun perbedaan tingkat radiasi matahari untuk masing-masing bulan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Ini berarti pada saat mengalami

musim kemarau dan penghujan, tidak terlalu mempengaruhi intensitas radiasi matahari yang ada di pulau Mandangin.

Radiasi matahari terendah terletak pada bulan Desember, yaitu sebesar 4,13 kWh/m², sedangkan untuk tingkat radiasi matahari tertinggi ada pada bulan April, yaitu sebesar 6,86 kWh/m². Dan pada tabel 4.3 diketahui total radiasi matahari untuk satu tahun sebesar 65,39 kWh/m² dan tingkat radiasi matahari rata-rata sebesar 5,449 kWh/m².

Dari gambar 4.2 terlihat bahwa terjadi perbedaan yang cukup signifikan, melihat dari kecepatan angin terendah dan kecepatan angin yang paling tinggi. Kecepatan angin terendah terdapat pada bulan Mei, yaitu 2,68 m/s, dan kecepatan angin tertinggi sebesar 6,35 m/s, terletak pada bulan Januari. Dan rata-rata kecepatan angin dalam satu tahun sebesar 4,636 m/s.

4.1.4. Data Spesifikasi Komponen Sistem yang ada di Pasaran

Dalam perancangan ini juga dibutuhkan data spesifikasi komponen sistem yang telah ada di pasaran, yaitu panel surya, turbin angin, baterai, dan konverter. Dengan demikian setelah spesifikasi yang dibutuhkan selesai dihitung, dapat dianalisis langkah apa yang harus diambil agar sistem yang dirancang dapat terealisasi.

Spesifikasi utama dari panel surya ditunjukkan oleh besarnya daya keluaran maksimumnya, dinyatakan dalam satuan *watt-peak* (Wp). Berikut contoh spesifikasi dari panel surya yang ada di pasaran pada situs www.anekapanel.com.

Tabel 4.4 Contoh Spesifikasi Panel Surya yang Ada di Pasaran

Daya Nominal	20 Wp	50 Wp	80 Wp	100 Wp	140 Wp
Tegangan MPPT	17,4 Vdc				18 Vdc
Tegangan Hubung Buka	21,6 Vdc				22,2 Vdc
Arus MPPT	1,15 A	2,87 A	4,6 A	5,75 A	7,78 A
Arus Hubung Singkat	1,27 A	3,16 A	5,06 A	6,33 A	8,40 A
Suhu operasi	-40 ~ +85°C				
Dimensi	615x285x25 mm	600x600x30 mm	1066x811x40 mm	1200x540x30 mm	1210x808x35 mm
Berat	2,5 kg	5 kg	9 kg		12 kg
Tipe sell	<i>Monocrystalline</i>				
Efisiensi	18,69% (±1%)				
Dimensi sel	125x125mm ±0.5				
Kaca	High Transmissivity Iron-Low 3,2mm				
Laminasi	EVA (ethylene vinyl acetate)				
Proteksi	IP65				

Spesifikasi utama dari baterai adalah kapasitas baterai yang dinyatakan dalam ampere.hour (Ah). Baterai yang tersedia di pasaran ada bermacam-macam sesuai dengan kebutuhan, antara lain:

Tabel 4.5 Contoh Spesifikasi Baterai yang Ada di Pasaran

Tegangan Nominal	12 V				
Kapasitas Nominal	33 Ah	60 Ah	65 Ah	100 Ah	120 Ah
Design Life	10 Tahun				
Suhu Operasi	-25° Celcius s/d 60° Celcius				
Dimensi	180x195x130 mm	235x260x169 mm	185x355x167 mm	227x330x171 mm	225x410x177 mm
Berat	10,2 kg	20,5 kg	20,6 kg	30,6 kg	37,6 kg

Spesifikasi utama dari konverter tiga-fasa adalah kapasitas daya yang mampu disalurkan oleh konverter tersebut. Berikut contoh spesifikasi lengkapnya:

Tabel 4.7 Contoh Spesifikasi Konverter 3 Fasa yang Ada di Pasaran

Daya Output kontinyu	50 kW	75 kW	85 kW	100 kW	150 kW
Tegangan AC nominal	208, 240, 480 atau 600 VAC, 3Ph, (3 wire standard, 4 wire option)				
Tegangan masukan maksimum	600 VDC				
Range tegangan input	300 - 500 VDC				
Frekuensi nominal	50 Hz				
Batas frekuensi output	50 - 60.5 Hz				
Arus output DC nominal	176 A	211 A	264 A	299 A	351 A
Arus output AC nominal : 208 VAC	139 A	167 A	208 A	236 A	278 A
240 VAC	120 A	144 A	180 A	205 A	240 A
480 VAC	60 A	72 A	90 A	102 A	120 A
600 VAC	48 A	58 A	72 A	82 A	96 A
Efisiensi	97.70%	97.80%	97.10%	96.70%	96.90%
Batas Suhu	-40° C – 50° C				
Berat	659 kg		852 kg	941 kg	
Dimensi	1986 mm x 1270 - 1346 mm x 838 mm				

Spesifikasi utama dari turbin angin dinyatakan dalam bentuk satuan daya (W), yaitu daya maksimal yang mampu dibangkitkan oleh turbin, berdasarkan kecepatan angin. Berikut ini adalah spesifikasi turbin angin yang berada di pasaran.

Tabel 4.8 Contoh Spesifikasi Turbin Angin yang Ada di Pasaran

Daya Nominal	200 W	400 W	700 W
Tegangan Output	12 VDC		

Kecepatan angin minimum	1,5 m/s	2,5 m/s	2,5 m/s
Kecepatan angin standar	5 m/s	9,5 m/s	10,5 m/s
Jumlah bilah kincir	6	3	3
Diameter bilah kincir	100 cm	150 cm	160 cm
Tipe generator	Magnet Permanen		
Rekomendasi baterai	50 - 100 Ah (12 VDC)	50 - 100 Ah x 2 Unit (Seri 24 VDC)	

4.1.5. Data Karakteristik Indeks Bunga di Indonesia

Data ini diperlukan dalam analisis ekonomis perancangan. Seperti diketahui sebelumnya bahwa uang memiliki nilai waktu, yang besarnya ditentukan oleh suku bunga suatu Negara. Di Indonesia, standart suku bunga yang berlaku adalah suku bunga yang ditetapkan oleh Bank Indonesia, atau biasa disebut sebagai BI rate. Besarnya tidak tetap, berubah-ubah sesuai dengan kondisi keuangan di Indonesia, namun bukan berarti nilainya tidak dapat kita perkirakan. Nilai BI rate untuk Tahun 2013 berkisar antara 5 -8% seperti terlihat pada Tabel 4.9 berikut:

Tabel 4.9 BI Rate dalam Satu Tahun Terakhir

Tanggal	BI Rate
12 Desember 2013	7,50%
12 November 2013	7,50%
8 Oktober 2013	7,25%
12 September 2013	7,25%
29 Agustus 2013	7,00%
15 Agustus 2013	6,50%
11 Juli 2013	6,50%
13 Juni 2013	6,00%
11 April 2013	5,75%
7 Maret 2013	5,75%
12 Februari 2013	5,75%
10 Januari 2013	5,75%

Sumber : www.bi.go.id

Dari tabel diatas tampak bahwa suku bunga di Indonesia pada Januari 2013 5,75%, lalu bertahan hingga bulan April 2013. Bulan Juni naik menjadi 6,00%, dan terus naik hingga Desember 2013. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa suku bunga di Indonesia relatif cenderung naik, sehingga dalam perhitungan nantinya dapat kita gunakan suku bunga terakhir sebagai acuan, yaitu 7,50%.

4.2. Perancangan Sistem

Penentuan kebutuhan total beban merupakan langkah awal dalam merancang sistem hibrid antara panel surya dan turbin angin. Penentuan kebutuhan total beban harian

pulau Mandangin telah dijelaskan pada bahasan sebelumnya. Pada sistem hibrid yang dirancang, panel surya dan turbin angin mensuplai sebagian kebutuhan energi, terutama pada siang hari saat modul panel surya dapat bekerja secara maksimal. Sisanya dipasok oleh turbin angin yang cenderung lebih fleksibel dalam menghasilkan daya, karena pada malam hari, angin masih bertiup dan turbin angin dapat beroperasi.

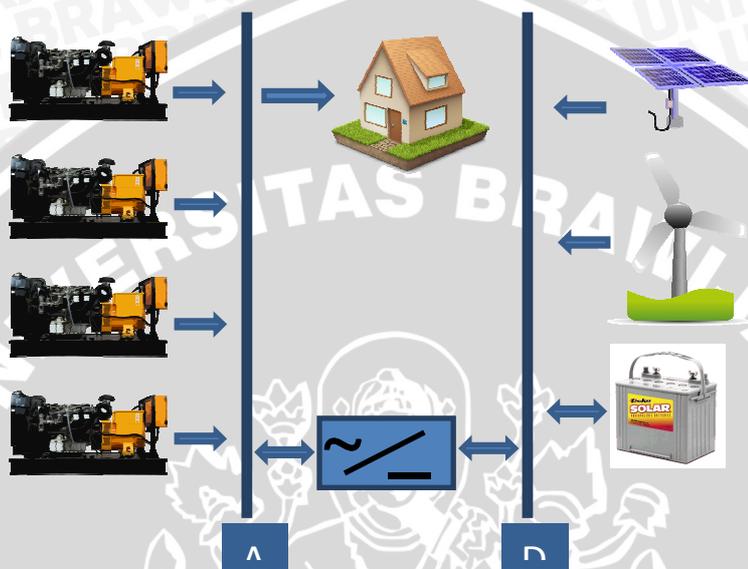
Pada bab ini akan dibahas penentuan dari masing-masing komponen sistem pembangkit listrik hibrida berdasarkan karakteristik beban yang ada, yang terdiri dari perancangan modul panel surya, turbin angin, perancangan baterai dan perancangan konverter tiga fasa yang akan digunakan. Untuk menentukan spesifikasi dari tiap komponen yang dibutuhkan, terlebih dahulu kita harus menentukan, seberapa besar daya yang akan dipasok oleh sistem yang dirancang.

Penggunaan sistem panel surya dan turbin angin sebagai pembangkit listrik harus dilakukan seoptimal mungkin karena biaya pembangkitannya untuk saat ini masih sangat mahal, terutama untuk turbin angin yang cenderung masih baru-baru ini digunakan dan dalam hal teknologi penyimpanannya. Oleh karena itu, prinsip utama pengaturannya adalah pemanfaatan energi dari *photovoltaic* ini lebih diarahkan pada saat modul panel surya bekerja (siang hari). Dalam hal ini, pada keadaan normal sistem sudah dapat mulai bekerja sekitar pukul enam pagi. Pada waktu ini penyinaran sudah cukup baik, serta sudah ada cukup energi yang tersimpan di baterai sebagai cadangan energi pada malam hari.

Walaupun diinginkan sistem panel surya bekerja antara jam enam pagi sampai jam enam sore, bukan berarti setiap hari sistem bekerja terus menerus seperti itu. Keadaan ini dirancang untuk cuaca paling buruk rata-rata. Sedangkan pada keadaan paling baik (sinar matahari terik sepanjang hari, memungkinkan sistem memasok beban hingga lebih dari jam enam sore, tergantung pada ketersediaan energi yang masih tersimpan pada baterai dan angin yang tersedia untuk memutar turbin angin.

Dari Tabel 4.3, ditentukan perancangan pembangkit listrik hibrida panel surya dengan turbin angin untuk membantu peran mesin diesel milik PLN, terutama untuk mesin-mesin yang memiliki usia yang sudah lama. Ditentukan 3 konfigurasi PLH yang akan dibuat berdasar data beban dan data mesin diesel yang ada pada pulau Mandangin. Konfigurasi pertama adalah konfigurasi dengan melibatkan komponen PLTD *existing* dari pulau Mandangin. Dimana konfigurasi tersebut nantinya akan dibandingkan dengan konfigurasi PLH untuk mendapatkan hasil yang terbaik dari perbandingan berbagai konfigurasi tersebut. Konfigurasi kedua ialah konfigurasi dengan asumsi bahwa generator dengan usia lebih dari 25 tahun sudah tidak digunakan dan digantikan oleh energi

terbarukan. Konfigurasi ketiga ialah konfigurasi dengan asumsi semua generator masih mampu beroperasi dan menghibridnya dengan energi terbarukan. Pada konfigurasi ini PLTD masih menjadi penghasil energi utama, maka diperlukan penentuan pola operasi generator agar didapatkan sistem yang beroperasi secara optimal mengingat bahan bakar menjadi faktor terbesar dalam hal pengeluaran biaya. Adapun konfigurasi sistem secara umum yang akan dimasukkan ke dalam *software* HOMER adalah sebagai berikut.



Gambar 4.6 Sistem Konfigurasi PLH

Dari Gambar 4.6 dapat dilihat komponen apa saja yang akan digunakan dalam konfigurasi sistem PLH. Dimulai dari pemilihan spesifikasi alat sesuai yang ketersediaannya di pasaran, juga ditentukan dari beban yang akan dipasok. Melihat dari Tabel 4.10, penentuan photovoltaic yang digunakan menyesuaikan jam kerja dari matahari, yaitu dari jam 6 pagi sampai jam 6 sore. Ini berarti peran *photovoltaic* sebagai sumber energi listrik hanya digunakan saat beban dasar berlangsung. Beban dasar tertinggi terdapat pada pukul 17.00 yaitu sebesar 287 kW, maka ditentukan pemasangan *photovoltaic* yang mampu menyuplai beban dasar sebesar 300 kW dengan penentuan komponen photovoltaic yang dipakai adalah photovoltaic dengan kapasitas 100 Wp. Kapasitas ini diberikan pada saat asumsi pertama yaitu generator dengan kapasitas 100 kW yang memiliki usia diatas 25 tahun tidak beroperasi. Sedangkan untuk asumsi kedua dimana seluruh generator dipergunakan, dari *trial* dan *error* yang dilakukan pada *software* HOMER, ditentukan photovoltaic dengan kapasitas 100 kW, hal ini disebabkan proporsi PV dalam menghasilkan energi listrik hanya sebesar 5 % dari seluruh energi yang dibangkitkan selama satu tahun.

Berbeda dengan *photovoltaic*, turbin angin memiliki waktu operasi yang cenderung tidak menentu, berdasarkan keadaan angin saat itu. Dilihat dari Tabel 4.8, ditentukan pemilihan turbin angin dengan kapasitas 200 W. Hal ini dikarenakan komponen yang bekerja pada sistem dengan tegangan 12 V dan melihat kesesuaiannya dengan data kecepatan angin yang tersedia. Selain itu rekomendasi baterai yang digunakan pada turbin angin 200 W memenuhi sistem, sesuai dengan sesuai Tabel 4.8, begitu juga kecepatan angin yang dibutuhkan untuk mencapai *rated wind speed* dari komponen. Dikarenakan turbin memiliki harga lebih mahal dengan kapasitas yang cukup kecil, dan kebutuhan akan lahan untuk turbin angin yang cukup besar, maka ditentukan proporsi turbin angin yang sesuai, yaitu sebesar 150 kW. Hal ini didapatkan dari *trial and error* yang dilakukan pada software HOMER yaitu dengan kecepatan angin yang sedemikian rupa dan dengan kapasitas yang ditentukan, turbin angin hanya mampu memberikan kontribusi sebesar 4 % dalam menghasilkan energi listrik dibandingkan dengan total energi yang dibangkitkan selama satu tahun.

Penentuan konverter disesuaikan dengan daya yang akan disuplai oleh *photovoltaic* yaitu sebesar 300 kW. Untuk penentuan baterai yang digunakan, menggunakan baterai dengan kapasitas 100 Ah. Tegangan kerja baterai ini besarnya harus sama atau mendekati sama dengan tegangan keluaran modul yaitu 360 V_{DC}. Karena ketersediaannya adalah sel-sel baterai 12 V, maka sel-sel baterai tersebut harus diseri hingga mendapat nilai yang diinginkan, yaitu 360 V. Dalam hal ini jumlah sel-sel baterai yang diseri adalah 30 sel. Selain itu, karena baterai tidak boleh sampai keadaan habis, maka ada faktor lain yang perlu diperhitungkan, yaitu *deep of discharge* (DOD). Besarnya DOD untuk baterai pada umumnya 80%, artinya, energi yang dapat diberikan baterai hanya 80% dari kapasitas yang sesungguhnya, setelah itu baterai harus kembali diisi. Sehingga perhitungan kapasitas baterai sebagai berikut:

$$\text{Kapasitas Baterai} = \frac{E_B}{V_B \times \text{DOD}} = \frac{300 \text{ kWh}}{360 \text{ V} \times 0,8} = 1041,67 \text{ Ah}$$

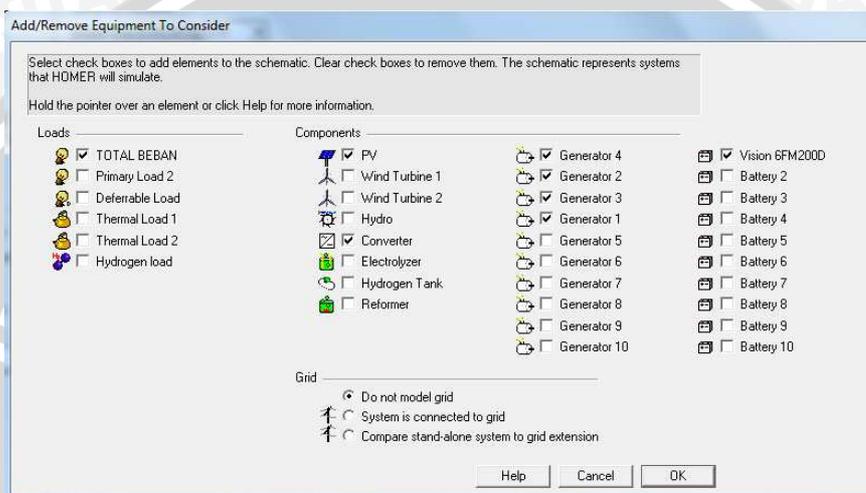
Menganggap kapasitas baterai 1000 Ah, maka baterai harus disusun parallel sebanyak 10 buah. Sehingga total baterai yang digunakan menjadi 30 seri x 10 parallel = 300 sel baterai. Berikut adalah penentuan komponen yang akan dimasukkan ke dalam software HOMER secara umum sesuai dengan konfigurasi yang telah dirancang.

Berikut adalah spesifikasi komponen yang digunakan dan dimasukkan ke dalam *software* HOMER dengan melihat ketersediaan komponen yang ada di pasaran. Dimulai dari kapasitas komponen, harga masing-masing komponen, biaya pengganti dari masing-

masing komponen serta umur pakai dari komponen tersebut seperti yang terlihat pada Tabel 4.10.

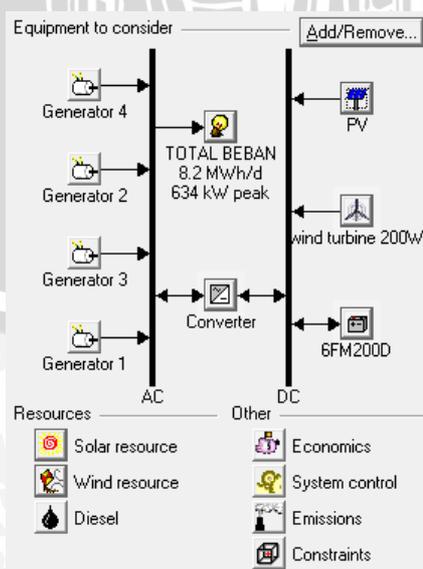
Tabel 4.10 Komponen Input Software HOMER

Komponen	Kapasitas	Harga	Biaya Pengganti	Lifetime
Generator	800 kW	\$0	\$0	15000 jam
Photovoltaic	100 W	\$190	\$190	25 tahun
Turbin Angin	200 W	\$630	\$630	15 tahun
Baterai	100 Ah	\$200	\$200	10 tahun
Konverter	300 KW	\$77,037	\$77,037	15 tahun



Gambar 4.7 Penentuan Komponen pada HOMER

Dalam Gambar 4.7 terlihat komponen apa saja yang akan dimasukkan ke dalam konfigurasi yang akan dibuat. Selanjutnya dimasukkan data komponen yang telah ditentukan kedalam konfigurasi yang telah dibuat pada software HOMER, maka didapatkan konfigurasi secara umum pada HOMER sebagai berikut.



Gambar 4.8 Konfigurasi Sistem PLH

Terlihat pada Gambar 4.8 beberapa data pendukung yang harus dimasukkan seperti terlihat pada icon Diesel, *Economics* dan lainnya. Untuk data radiasi matahari dan kecepatan angin, bisa dilihat dari Tabel 4.3, sedangkan untuk data pendukung lainnya dapat terlihat pada gambar dibawah.

Gambar 4.9 Data Diesel

Gambar 4.10 Data *Economics*

Pada gambar 4.9 terlihat data yang dibutuhkan berupa harga bahan bakar yang digunakan. Sesuai data yang didapatkan bahwa PLN menggunakan bahan bakar berupa Solar dengan harga industri sebesar Rp. 9.800/L atau sebesar \$0.8145/L disesuaikan dengan perkembangan kurs Rupiah-Dollar terakhir pada tanggal 13 Desember 2013 sebesar Rp. 12.031,- yang dapat dilihat pada situs Bank BI www.bi.go.id.

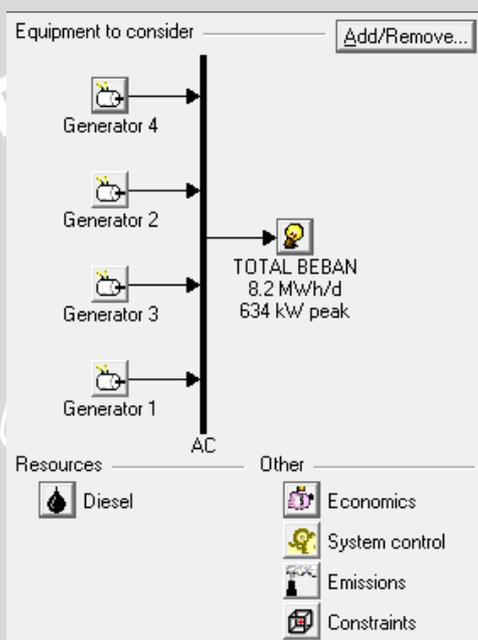
Sedangkan untuk data pada Gambar 4.10 berisi tentang nilai indeks bunga yang berlaku. Untuk Indonesia sendiri tertanggal 12 Desember 2013 indeks bunga jatuh pada

nilai 7,50 %, sesuai dengan Tabel 4.9 yang juga dapat dilihat dari situs resmi Bank Indonesia.

4.3. Hasil Simulasi

4.3.1 Konfigurasi PLTD Existing

Simulasi konfigurasi ini dimaksudkan untuk menjadi acuan hasil simulasi pada konfigurasi lain yang telah ditentukan. Konfigurasi ini berisi generator-generator yang sudah tersedia di pulau Mandangin sendiri. Dengan asumsi generator ini mampu menyuplai beban untuk perhitungan selama 25 tahun mendatang, maka akan menghasilkan konfigurasi dan hasil simulasi seperti pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 berikut.



Gambar 4.11 Konfigurasi Sistem PLTD Existing

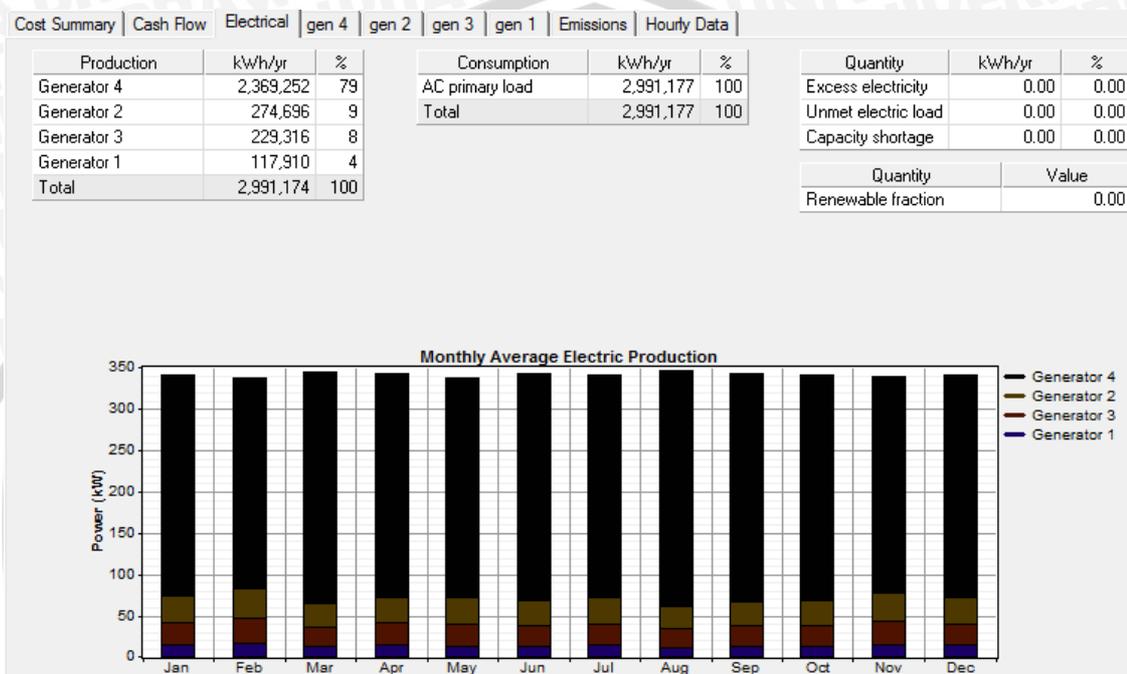
	gen 4 (kW)	gen 2 (kW)	gen 3 (kW)	gen 1 (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	gen 4 (hrs)	gen 2 (hrs)	gen 3 (hrs)	gen 1 (hrs)
	500	100	100	100	\$ 0	884,234	\$ 9,856,507	0.296	0.00	1,075,794	6,494	3,735	2,531	2,264

Gambar 4.12 Konfigurasi Sistem PLTD Existing

Pada Gambar 4.11 terlihat bentuk konfigurasi dari PLTD yang telah ada di pulau Mandangin. Dengan memasukkan data komponen dan sensitivitas yang berlaku di Indonesia seperti harga bahan bakar diesel dan indeks bunga, serta menganggap mesin diesel 1 selesai *overhaul* dan sistem mampu bertahan untuk 25 tahun ke depan, maka didapatkan hasil simulasi seperti terlihat pada Gambar 4.12. Hasil simulasi ini nantinya akan dibandingkan dengan konfigurasi baru penggabungan PLTD dan sumber energi terbarukan yang akan dimasukkan ke dalam konfigurasi sistem sebagai acuan apakah konfigurasi PLH yang dirancang mampu mengoptimasi kerja dari PLTD existing.

4.3.1.1 Analisis Kelistrikan

Dalam analisis ini akan ditampilkan hasil simulasi berupa peran dari masing-masing generator dalam memenuhi kebutuhan listrik yang akan ditampilkan dalam kurun waktu tahunan. Berikut juga dengan kelebihan energi listrik yang mungkin dihasilkan oleh konfigurasi sistem yang dibuat. Adapun lebih lanjut mengenai analisis ini akan ditampilkan pada Gambar 4.13 berikut.

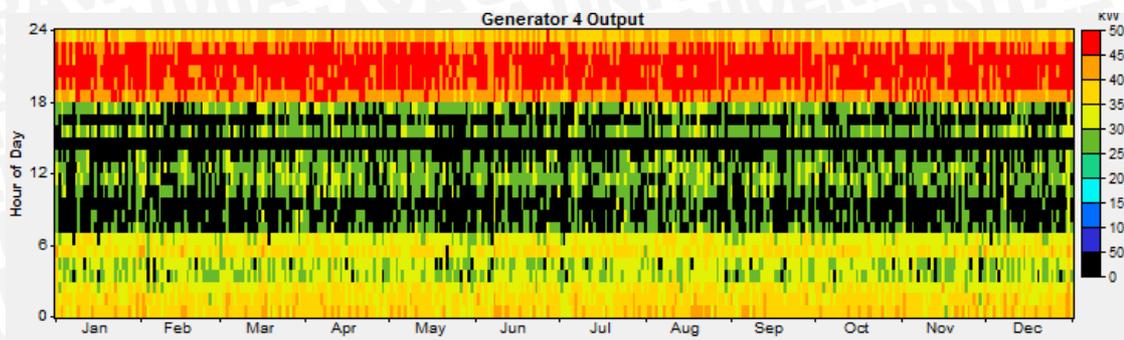


Gambar 4.13 Hasil Simulasi (*Electrical*)

Gambar 4.13 memperlihatkan peran operasi masing-masing mesin diesel dalam menghasilkan energi listrik yang dibutuhkan beban. Dari total daya yang dibangkitkan dan dibutuhkan beban sebesar 2.991.174 kWh/tahun, generator 4 dengan kapasitas 500 kW memiliki peran tertinggi dalam menghasilkan energi listrik sebesar 79% atau sebesar 2.369.252 kWh/tahun. Hal ini juga dapat dilihat pada grafik yang terdapat pada Gambar 4.13, bahwa generator 4 (grafik dengan warna hitam) menyuplai beban terbesar untuk masing-masing bulan dalam satu tahun. Disusul dengan generator 2 dengan produksi energi listrik sebesar 9% atau sebesar 274.696 kWh/tahun, generator 3 dengan proporsi 8% atau sebesar 229,316 kWh/tahun dan terakhir generator 4 dengan proporsi produksi kWh sebesar 4% pertahun atau sebesar 117.910 kWh/tahun.

Generator 4 yang memiliki kapasitas tertinggi disini tetap beroperasi baik pada saat beban dasar berlangsung dan saat beban puncak sekalipun seperti terlihat pada Gambar 4.14 di bawah. Namun karena generator bekerja sesuai dengan permintaan beban, maka pada kolom *excess electricity*, kelebihan sumber energi tidak dihasilkan atau sebesar 0%.

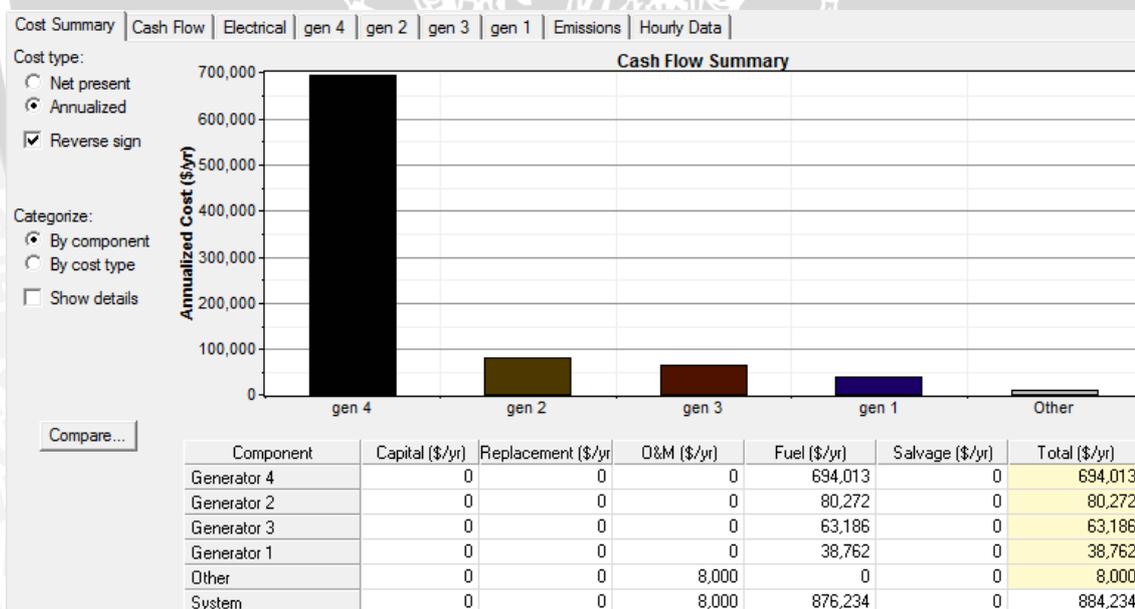
Pada Gambar 4.14 memperlihatkan jam operasi rata-rata perharinya dalam satu tahun yang dihasilkan oleh generator 4. Dan terbukti pada saat siang hari pun generator 4 masih beroperasi walaupun daya yang dibangkitkan cenderung kecil. Berbeda dengan malam hari yang mampu mengoperasikan generator 4 pada kapasitas maksimumnya seperti yang terlihat pada Gambar 4.14 (grafik berwarna merah).



Gambar 4.14 Jam Operasi Generator 4 Sistem PLTD Existing

4.3.1.2 Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi disini mengacu pada beberapa hal, yaitu besar biaya pemasangan (*Initial Capital*), besar nilai NPC (*Net Present Cost*), dan berapa besar biaya yang dikeluarkan untuk bahan bakar yang digunakan oleh konfigurasi sistem. Berikut adalah hasil simulasi ekonomi yang dihasilkan HOMER pada konfigurasi PLTD existing.



Gambar 4.15 Hasil Simulasi (*Economics*)

Gambar 4.15 memperlihatkan hasil ekonomi rata-rata pertahun yang dihasilkan oleh PLTD existing, seperti biaya rata-rata O&M (*Operation and Maintenance*) yang harus dikeluarkan pertahun dan biaya bahan bakar yang harus dibayar tiap tahunnya. Untuk melihat hasil simulasi ekonomi lainnya kita bisa melihat hasil simulasi pada Gambar 4.12

di atas. Terlihat pada Gambar tersebut total NPC yang dikeluarkan pada operasi sistem selama 25 tahun mencapai \$ 9,856,507. dengan penggunaan bahan bakar mencapai 1.075.794 liter/tahun atau seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.15, biaya bahan bakar mencapai \$ 876,234/tahun atau dengan rincian penggunaan bahan bakar masing-masing generator seperti pada Gambar berikut.

Quantity			Value			Units		
Hours of operation	6,494	hr/yr	Electrical production	2,369,252	kWh/yr	Fuel consumption	852,073	L/yr
Number of starts	1,004	starts/yr	Mean electrical output	365	kW	Specific fuel consumption	0.360	L/kWh
Operational life	2.31	yr	Min. electrical output	273	kW	Fuel energy input	8,384,400	kWh/yr
Capacity factor	54.1	%	Max. electrical output	500	kW	Mean electrical efficiency	28.3	%
Fixed generation cost	82.6	\$/hr						
Marginal generation cost	0.204	\$/kWh						

Gambar 4.16 Hasil simulasi Generator 4 Sistem PLTD Existing

Quantity			Value			Units		
Hours of operation	3,735	hr/yr	Electrical production	274,696	kWh/yr	Fuel consumption	98,554	L/yr
Number of starts	1,366	starts/yr	Mean electrical output	73.5	kW	Specific fuel consumption	0.359	L/kWh
Operational life	4.02	yr	Min. electrical output	30.0	kW	Fuel energy input	969,772	kWh/yr
Capacity factor	31.4	%	Max. electrical output	100	kW	Mean electrical efficiency	28.3	%
Fixed generation cost	16.5	\$/hr						
Marginal generation cost	0.204	\$/kWh						

Gambar 4.17 Hasil Simulai Generator 2 Sistem PLTD Existing

Quantity			Value			Units		
Hours of operation	2,531	hr/yr	Electrical production	229,316	kWh/yr	Fuel consumption	77,577	L/yr
Number of starts	1,179	starts/yr	Mean electrical output	90.6	kW	Specific fuel consumption	0.338	L/kWh
Operational life	5.93	yr	Min. electrical output	30.0	kW	Fuel energy input	763,357	kWh/yr
Capacity factor	26.2	%	Max. electrical output	100	kW	Mean electrical efficiency	30.0	%
Fixed generation cost	16.5	\$/hr						
Marginal generation cost	0.204	\$/kWh						

Gambar 4.18 Hasil Simulasi Generator 3 Sistem PLTD Existing

Quantity			Value			Units		
Hours of operation	2,264	hr/yr	Electrical production	117,910	kWh/yr	Fuel consumption	47,589	L/yr
Number of starts	1,005	starts/yr	Mean electrical output	52.1	kW	Specific fuel consumption	0.404	L/kWh
Operational life	6.63	yr	Min. electrical output	30.0	kW	Fuel energy input	468,281	kWh/yr
Capacity factor	13.5	%	Max. electrical output	72.7	kW	Mean electrical efficiency	25.2	%
Fixed generation cost	16.5	\$/hr						
Marginal generation cost	0.204	\$/kWh						

Gambar 4.19 Hasil Simulasi Generator 1 Sistem PLTD Existing

Gambar 4.16 sampai dengan Gambar 4.19 diatas menunjukkan hasil simulasi yang beragam. Contohnya seperti jam operasi generator bekerja dan berapa konsumsi BBM yang dihabiskan generator pada saat jam kerja tersebut berlangsung. Generator 4 memiliki konsumsi bahan bakar tertinggi dikarenakan kapasitasnya yang besar serta jam operasi yang tinggi pula. Dari total bahan bakar pertahun yang dikeluarkan sebesar 1.075.794 liter/tahun, generator 4 mengkonsumsi 79,2% dari total bahan bakar yang dikeluarkan atau sebesar 852.073 liter/tahun. Hal ini yang seharusnya menjadi perhatian mengingat jam

operasi generator 4 pada siang hari yang lebih sedikit dari generator lain dan daya yang dibangkitkan juga cenderung rendah.

Untuk biaya *Initial Capital* pada konfigurasi ini, seperti yang terlihat pada 4.12 memperlihatkan nilai \$ 0, atau tidak ada biaya awal seperti halnya penyediaan alat dan pemasangan alat. Hal ini memang dikarenakan generator-generator sudah *existing* di sana, dan tidak perlu memasukkan biaya penyediaan komponen pada saat memasukkan data ke dalam *software* HOMER.

4.3.1.3 Analisis Lingkungan

Lingkungan merupakan salah satu aspek yang turut menjadi perhatian dikarenakan tempat yang tersedia berhubungan langsung dengan penduduk disekitar. HOMER akan mensimulasi emisi yang dihasilkan oleh mesin diesel sesuai dengan lama operasi dari mesin diesel. Terutama emisi berupa karbon dioksida (CO₂) dan karbon monoksida (CO) yang dihasilkan oleh keberadaan sistem.

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	2,832,918
Carbon monoxide	6,993
Unburned hydrocarbons	775
Particulate matter	527
Sulfur dioxide	5,689
Nitrogen oxides	62,396

Gambar 4.19 Hasil Simulasi Emisi Sistem PLTD *Existing*

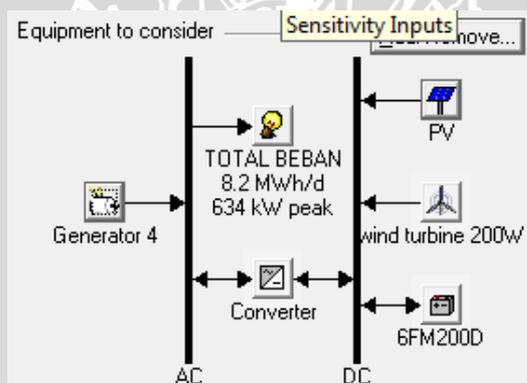
Gambar 4.19 menjabarkan hasil emisi apa saja yang terjadi akibat pembuangan sistem PLTD *existing*. Disini akan dibahas dua bentuk emisi gas yang cukup menjadi perhatian, yaitu karbon dioksida (CO₂) dan karbon monoksida (CO). Dari hasil simulasi didapatkan besarnya karbon dioksida yang dihasilkan mencapai 2.832.918 kg/tahun. Hal ini sungguh sangat mencengangkan bila dilihat dari dampak yang dapat terjadi akibat penambahan jumlah CO₂ di udara dalam jangka waktu yang sangat lama. Sistem ini juga menghasilkan emisi berupa karbon monoksida sebesar 6.993 kg/tahun.

Mengingat kadar masing-masing emisi tersebut sudah bertambah dari tahun-tahun dan mampu menyebabkan permasalahan yang serius. Dimana jika manusia menghirup karbon monoksida (CO) dalam jumlah besar dapat menyebabkan kematian dikarenakan darah dalam tubuh kekurangan oksigen. Sedangkan CO₂ sendiri akan sangat berbahaya jika kadar gas tersebut di atmosfer sudah melebihi batas yang ditetapkan karena akan merusak lapisan ozon. Kerusakan yang terjadi pada ozon dapat menyebabkan kanker kulit pada manusia akibat sinar matahari yang langsung jatuh ke bumi tanpa melalui ozon. Terlebih lagi untuk jangka waktu yang lama, akan terjadi efek rumah kaca pada lapisan ozon,

sehingga keadaan bumi semakin lama akan semakin panas dan yang paling parah akan menyebabkan melelehnya es di kutub. Untuk itu harus dilakukan sistem konfigurasi yang sekiranya mampu mengurangi jumlah emisi, salah satunya dengan mengurangi jumlah operasi sistem PLTD sehingga sistem mampu mengurangi penggunaan bahan bakar yang akan berdampak pada keluaran emisi dari sistem.

4.3.2 Konfigurasi Generator 4, PV dan Turbin Angin

Konfigurasi ini bertujuan untuk melihat apakah photovoltaic yang dirancang dengan kapasitas sesuai dengan beban dasar mampu memenuhi kebutuhan beban pada siang hari. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi pemakaian mesin diesel milik PLN yang dimana untuk generator tertentu memiliki usia yang cukup lama dengan efisiensi yang cenderung menurun. Dengan asumsi generator 1,2 dan 3 diposisikan dalam keadaan standby dan sistem hanya disuplai oleh generator 4 dan PV sebesar 300 kW sebagai pengganti kinerja generator lain, maka didapatkan bentuk konfigurasi dan hasil simulasi seperti pada Gambar 4.20 dan Gambar 4.21.



Gambar 4.20 Konfigurasi Generator 4, PV dan Turbin Angin

	PV (kW)	WT200	gen 4 (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	gen 4 (hrs)
	300	150	500	300	300	\$ 861,537	797,650	\$ 9,752,899	0.293	0.19	941,346	8,014
	300		500	300	300	\$ 767,037	826,932	\$ 9,984,800	0.299	0.16	975,440	8,143
		150	500	300	300	\$ 291,537	888,286	\$ 10,193,218	0.306	0.04	1,070,800	8,760
			500	300	300	\$ 197,037	914,185	\$ 10,387,408	0.312	0.00	1,101,990	8,760

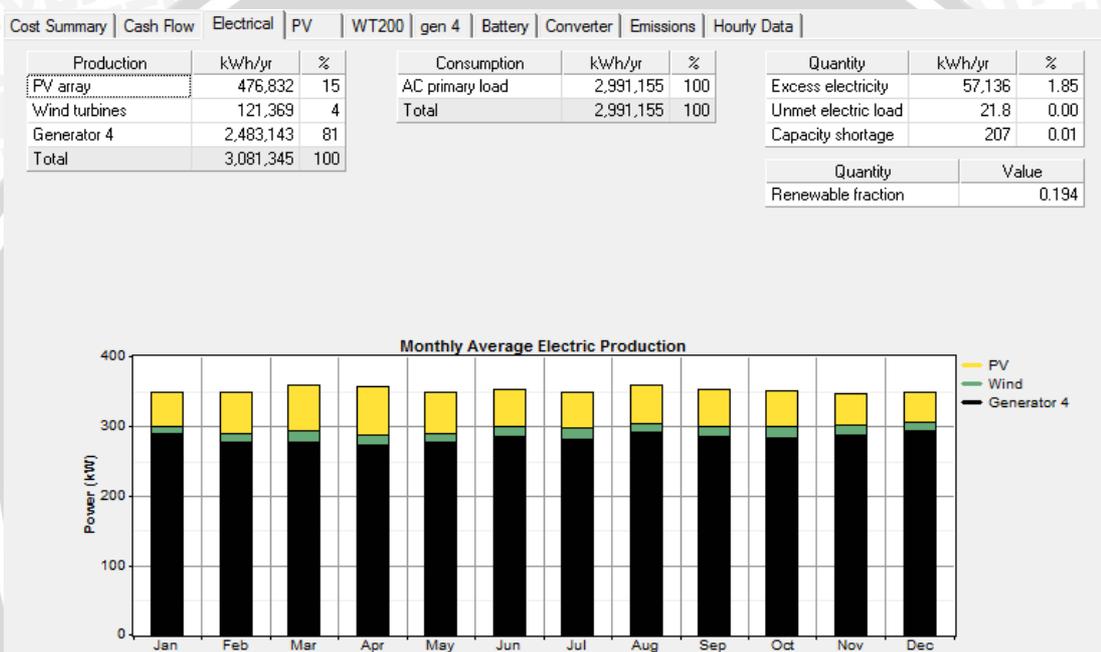
Gambar 4.21 Hasil Simulasi Konfigurasi Generator 4, PV dan Turbin Angin

Gambar 4.20 menunjukkan konfigurasi yang akan disimulasi tanpa memasukkan generator 1,2 dan 3 sebagai sumber energi listrik. Dan Gambar 4.21 menjelaskan hasil simulasi yang dilakukan oleh HOMER dengan memasukkan konfigurasi seperti Gambar 4.20 dan juga memasukkan data komponen beserta data-data tambahan yang berlaku di Indonesia. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi yang dibuat mampu memenuhi kebutuhan beban dan mengurutkannya berdasar nilai NPC terendah. Terlihat pada hasil simulasi saat konfigurasi menggunakan turbin angin yang terlihat pada kolom pertama dan

saat dimana konfigurasi tidak menggunakan turbin angin sebagai sumber energi listrik seperti terlihat pada kolom kedua.

4.3.2.1 Analisis Kelistrikan

Dalam analisa ini diperlihatkan peran masing-masing komponen dalam menyuplai kebutuhan listrik. Baik berupa energi yang dihasilkan, maupun kelebihan energi yang terjadi akibat penggunaan konfigurasi ini. Gambar dibawah menjelaskan peran masing-masing komponen baik untuk konfigurasi menggunakan turbin angin dan tanpa menggunakan turbin angin agar diketahui sistem mana yang paling baik dengan sumber energi terbarukan sebagai acuan.

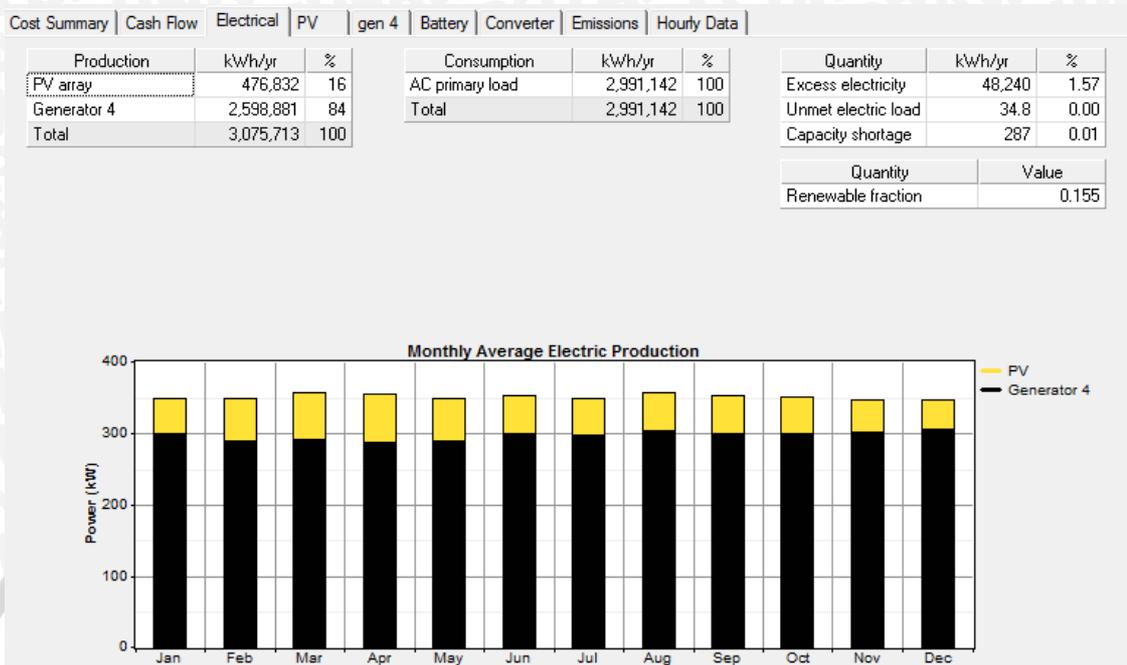


Gambar 4.22 Hasil Simulasi *Electricity* Konfigurasi Generator 4, PV dan Turbin Angin

Pada Gambar 4.22 tampak bahwa peran energi terbarukan berupa energi matahari dan angin dalam bentuk *photovoltaic* dan turbin angin mampu membantu kinerja generator 4 milik PLN. Terlihat dari skala 100%, peran *photovoltaic* dalam menyuplai energi listrik jatuh pada angka 15% atau menghasilkan energi listrik sebesar 476,832 kWh/tahunnya. Sedangkan peran turbin angin sendiri dalam memenuhi kebutuhan beban terpasang jatuh pada prosentase sebesar 4% atau sebesar 121,369 kWh/tahun. Prosentase ini cukup kecil dikarenakan kapasitas turbin angin yang cukup kecil untuk ukuran rangka yang lebih besar dibandingkan dengan *photovoltaic* maka perlu dibatasi apabila dilihat dari lahan yang tersedia.

Namun jika dilihat pada tabel *excess electricity* atau kelebihan energi yang dihasilkan dari hasil simulasi pada Gambar 4.22, tertera kelebihan energi sebesar 1,85% atau sebesar 57.136 kWh/tahun. Kelebihan energi ini menjadi salah satu hal yang cukup

penting dalam hal penggunaan sumber energi terbarukan mengingat efisiensi alat yang cenderung tidak terlalu besar.



Gambar 4.23 Hasil Simulasi *Electricity* Konfigurasi Generator 4 dan PV

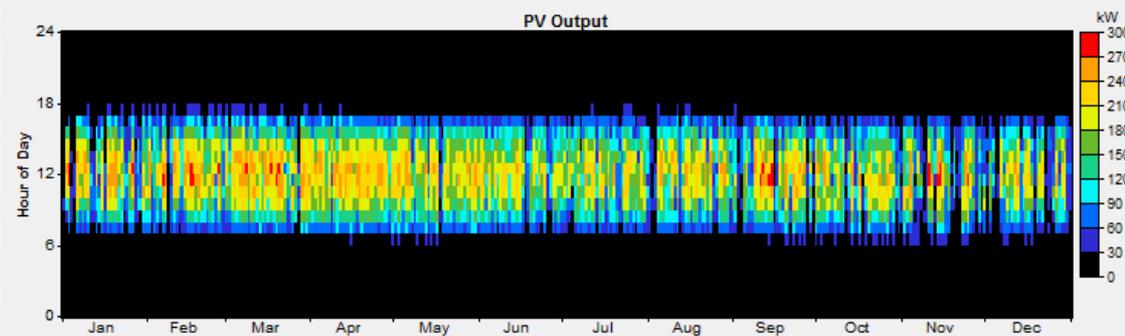
Gambar 4.23 menunjukkan hasil simulasi konfigurasi PLH tanpa menggunakan turbin angin sebagai salah satu sumber energi terbarukan. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui konfigurasi PLH seperti apa yang paling cocok digunakan, dilihat dari berbagai permasalahan yang ada. Dengan tanpa digunakannya turbin angin sebagai sumber energi terbarukan, tentu saja akan mempengaruhi jumlah produksi energi yang dihasilkan masing-masing sumber penyuplai energi.

Untuk prosentase photovoltaic dalam menyuplai energi listrik yang sebelumnya berada pada prosentase 15%, kini mengalami kenaikan menjadi 16% walaupun energi yang dihasilkan sama besar. Hal ini dikarenakan berkurangnya sumber energi listrik tidak mempengaruhi jumlah jam operasi dari *photovoltaic*. Sedangkan untuk generator 4 sendiri yang semula berada pada prosentase 81%, sekarang menjadi 84% atau yang semula sebesar 2.483.143 kWh/tahun menjadi sebesar 2.598.881 kWh/tahun. Dengan kata lain, pengurangan sumber energi listrik tentunya akan menaikkan jam operasi dari sumber energi listrik yang lain, dikarenakan photovoltaic memiliki jam operasi tertentu, maka yang meningkat adalah jam operasi dari generator 4.

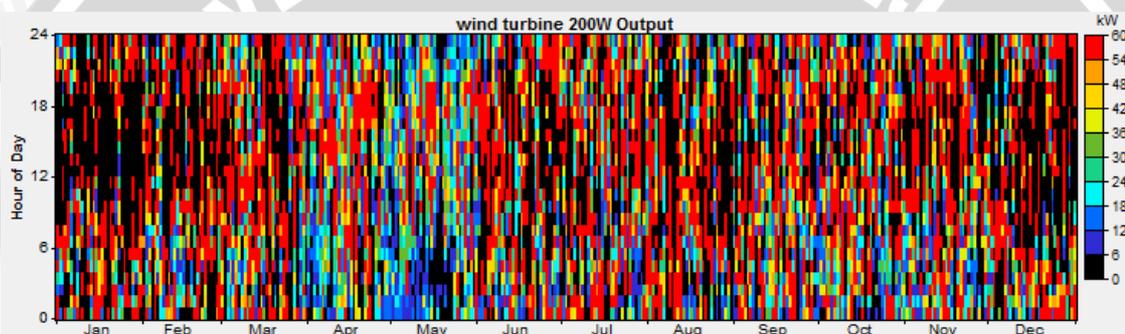
Pengurangan ini tentu saja akan berdampak pada *excess electricity* yang dihasilkan dari konfigurasi PLH. Terlihat dari yang sebelumnya sebesar 1,85%, kini *excess electricity* yang dihasilkan dari keberadaan PLH tanpa turbin angin menjadi 1,57% atau sebesar

48.240 kWh/tahun. Dimana pengurangan jumlah sumber energi listrik terbarukan juga akan mengurangi kelebihan energi yang dihasilkan dari keberadaan sistem PLH.

Berikut akan ditampilkan waktu operasi dari sumber energi terbarukan berupa *photovoltaic* dan turbin angin yang ditentukan oleh HOMER.



Gambar 4.24 PV Output



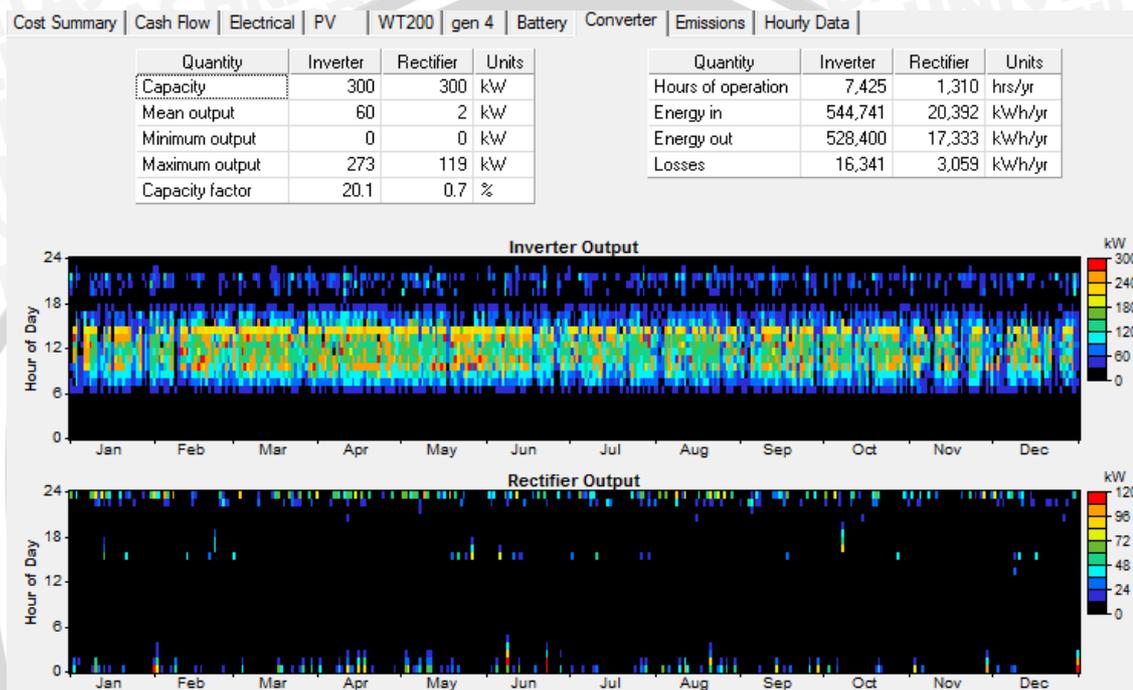
Gambar 4.25 Wind Turbine Output

Dalam Gambar 4.24 terlihat bahwa *photovoltaic* beroperasi hanya pada siang hari. Yaitu antara pukul 6 pagi sampai dengan pukul 6 sore. Dan keluaran *photovoltaic* sangat bervariasi menurut ketersediaan radiasi matahari yang berbeda-beda setiap bulannya. Untuk bulan-bulan dimana tingkat radiasi matahari yang cukup rendah, seperti pada bulan November dan Desember, terlihat pada Gambar 4.14 bahwa operasi *photovoltaic* yang tidak maksimal.

Pada Gambar 4.25 menunjukkan operasi rata-rata turbin angin dalam satu hari selama setahun. Terlihat pada gambar, operasi turbin angin yang tidak menentu dikarenakan angin yang berhembus juga tidak menentu kapan datang dan pergi. Dan waktu ketersediannya pun tidak dapat ditentukan, hal ini berbeda dengan *photovoltaic* yang waktu operasinya hanya terjadi di siang hari. Untuk itu peran energi terbarukan yang dihasilkan sistem PLH termasuk cukup besar melihat penyediaan energi listrik yang ditujukan bagi daerah kepulauan dan sumber energi yang cenderung tidak dapat diatur ketersediannya.

Baterai dan converter merupakan salah satu komponen pendukung konfigurasi sistem PLH yang sangat penting. Berikut adalah peran dari konverter yang dimasukkan

dalam konfigurasi sistem PLH. Konverter akan bekerja sebagai inverter dan sebagai rectifier dalam operasinya. Konverter akan bekerja sebagai inverter pada saat energi yang dihasilkan energi terbarukan akan disalurkan menuju beban, atau saat baterai bekerja sebagai penyuplai energi listrik. Sedangkan konverter akan bekerja sebagai rectifier saat sumber energi dari mesin diesel menghasilkan energi yang berlebih sehingga sisa energi akan disalurkan konverter menuju baterai. Ini biasa terjadi saat beban mulai meningkat dan *photovoltaic* sudah tidak beroperasi lagi.



Gambar 4.26 Hasil Simulasi Konverter

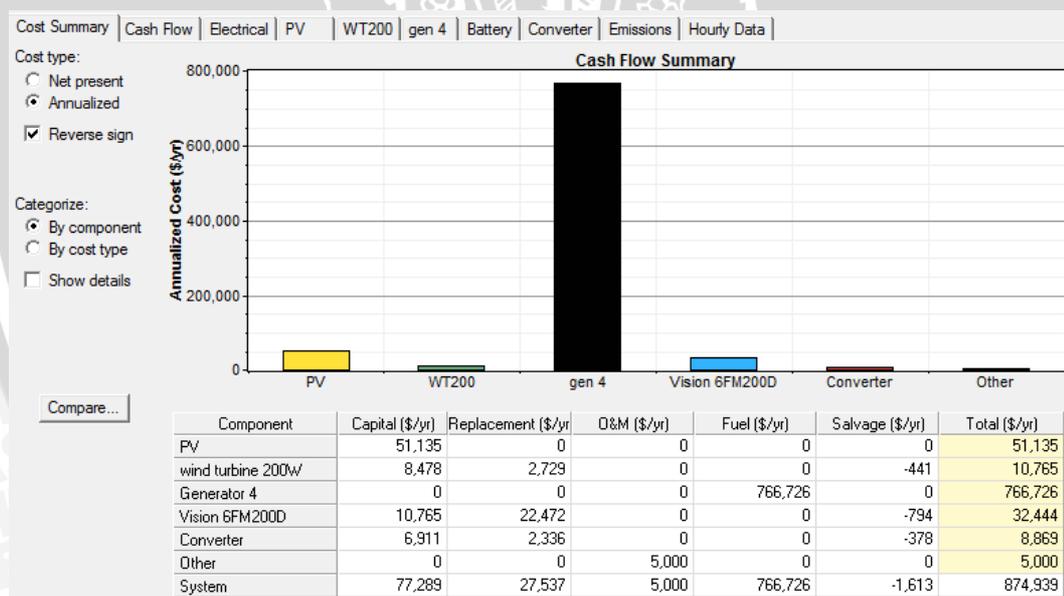
Dari gambar 4.26 terlihat pada tabel sebelah kanan, energi yang masuk dan keluar dari konverter, baik saat konverter bekerja sebagai inverter maupun rectifier. Energi yang melewati konverter dalam mode rectifier cenderung lebih sedikit dibanding dengan konverter saat beroperasi sebagai inverter. Hal ini dikarenakan penggunaan mesin diesel yang bekerja sesuai dengan beban yang disuplai dan kelebihan energi yang dihasilkan generator tidak terlalu besar untuk disimpan menuju baterai.

Pada grafik *Inverter Output*, terlihat bahwa konverter yang beroperasi sebagai inverter paling sering terjadi saat *photovoltaic* maupun turbin angin bekerja. Dimana beban membutuhkan sumber energi, dan energi terbarukan menghasilkan energi berupa DC yang dimana harus melalui inverter terlebih dulu untuk merubahnya menjadi energi AC yang dibutuhkan beban. Inverter juga bekerja pada malam hari saat generator dirasa kurang untuk menyuplai beban, disini lah baterai berfungsi sebagai sumber energi, dan harus pula melewati inverter sebelum pada akhirnya menuju ke beban.

Pada grafik *Rectifier Output*, terlihat rectifier tidak bekerja pada siang hari, karena pada saat ini konverter bekerja sebagai inverter. Rectifier biasanya bekerja pada malam hari untuk sistem PLH, disaat sumber energi dari energi terbarukan sudah hampir tidak ada. Karena photovoltaic hanya bekerja pada siang hari, maka pada malam hari disaat beban mulai meningkat dan mesin diesel memiliki energi berlebih, maka energi tersebut akan disalurkan ke baterai melalui rectifier. Karena rectifier dan inverter tidak dapat bekerja pada saat bersamaan, maka pada saat rectifier bekerja, konverter yang beroperasi sebagai inverter tidak akan bekerja, begitu juga sebaliknya.

4.3.2.2 Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi disini juga akan dibandingkan dua konfigurasi PLH dengan dan tanpa sumber energi terbarukan berupa turbin angin. Analisis ekonomi masih berupa pembahasan terkait biaya initial capital, total NPC dan pembahasan yang terkait dengan penggunaan bahan bakar baik dari segi jumlah yang digunakan maupun biaya yang dihasilkan dari penggunaan tersebut. Berikut adalah hasil simulasi yang dilakukan HOMER untuk kedua sistem konfigurasi.

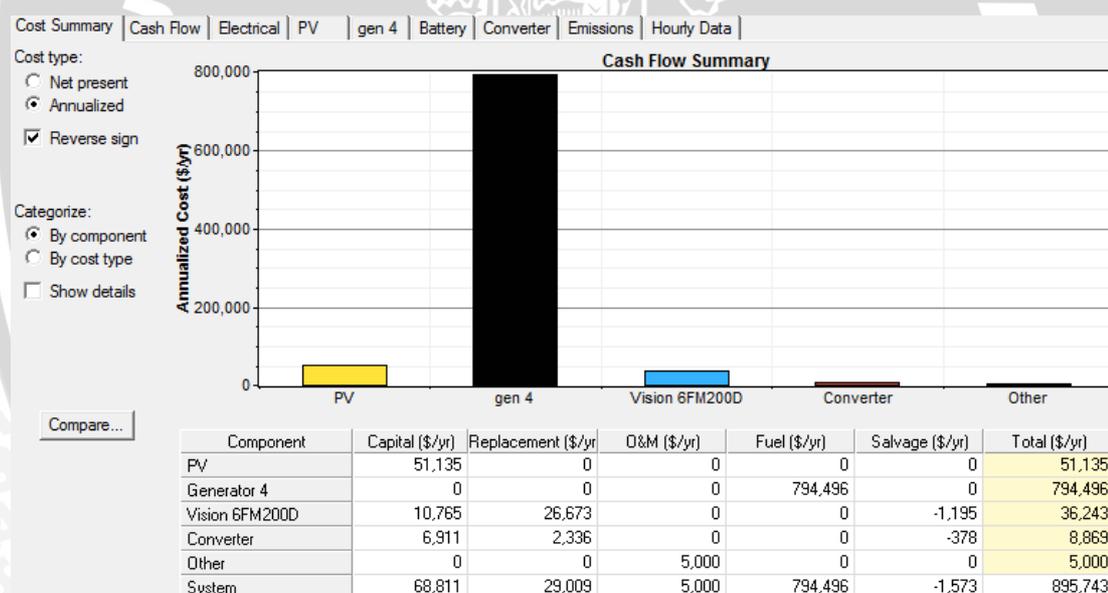


Gambar 4.27 Hasil Simulasi Tahunan Konfigurasi Generator 4, PV dan Turbin Angin

Pada Gambar 4.27 terlihat beberapa analisis yang dilakukan HOMER untuk konfigurasi yang telah ditetapkan dengan rata-rata pertahunnya selama 25 tahun. Sedangkan untuk nilai *Initial Capital* maupun Total NPC dapat dilihat dari hasil simulasi sebelumnya pada Gambar 4.21. Untuk konfigurasi PLH dengan komponen berupa generator 4, PV dan turbin angin ini memiliki Total NPC lebih kecil dibandingkan dengan Total NPC yang dihasilkan untuk konfigurasi PLTD *existing*, yaitu sebesar \$ 9,752,899 dengan perhitungan selama 25 tahun. Namun dibalik berkurangnya Total NPC yang

dihasilkan, konfigurasi sistem PLH ini memiliki biaya tambahan berupa biaya yang dihasilkan dari penyediaan komponen awal sistem atau yang disebut *Initial Capital*. Biaya ini cenderung cukup mahal dikarenakan komponen yang digunakan cukup banyak dan jika kita bandingkan dengan penurunan Total NPC, memang cenderung tidak seimbang dan masih lebih besar biaya yang dikeluarkan untuk penyediaan komponen sistem PLH. Namun jika dilihat dari tujuan awal berupa dukungan terhadap kebijakan pemerintah untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi, konfigurasi PLH ini menjalankan tugasnya.

Terbukti jika dilihat dari Gambar 4.21 tampak bahwa jumlah liter bahan bakar diesel yang dipakai pada konfigurasi sistem PLH ini cenderung turun menjadi 941.346 liter/tahun atau biaya bahan bakar sebesar \$ 766,726 pertahunnya. Dan biaya bahan bakar menjadi salah satu aspek tertinggi dalam penggunaan konfigurasi sistem yang ditentukan. Jika dilihat dari konfigurasi PLH ini biaya yang dihasilkan bahan bakar mencapai 87,6% dari total biaya yang harus dibayar selama 25 tahun.



Gambar 4.28 Hasil Simulasi Tahunan Konfigurasi Generator 4 dan PV

Gambar 4.28 memperlihatkan biaya rata-rata yang dihasilkan HOMER untuk konfigurasi PLH dengan komponen generator 4 dan PV sebagai sumber energi listrik. Pengurangan sumber energi listrik berupa turbin angin tentu akan mempengaruhi biaya awal dari sistem, dengan pengurangan tersebut, maka didapatkan biaya awal sebesar \$ 767,037. Namun dengan berkurangnya biaya awal akibat berkurangnya komponen yang digunakan, akan berdampak pula pada Total NPC dan penggunaan bahan bakar.

Pengurangan sumber energi terbarukan berupa turbin angin tentu akan menambah jam operasi dari generator 4, dan hal ini akan mejadikan pemakaian bahan bakar yang

lebih banyak untuk memenuhi kebutuhan beban akan energi listrik. Terbukti pada Gambar 4.21, jumlah bahan bakar yang digunakan meningkat jika dibandingkan dengan konfigurasi PLH menggunakan turbin angin menjadi sebesar 975.440 liter/tahun atau biaya sebesar \$ 794,469 yang harus dikeluarkan tiap tahunnya. Peningkatan yang terjadi dari sisi bahan bakar ini akan berdampak pula terhadap Total NPC yang dihasilkan, dimana yang kita tahu prosentase bahan bakar sangat mempengaruhi Total NPC yang dihasilkan. Dan Total NPC yang dihasilkan dari konfigurasi PLH tanpa turbin angin ini sebesar \$ 9,984,800.

4.3.2.3 Analisis Lingkungan

Analisis lingkungan dipengaruhi dari emisi yang dihasilkan generator dalam kaitannya dengan jam operasi yang berlaku pada generator tersebut. Dengan berkurangnya jam operasi dari generator berarti akan berkurang pula emisi yang dihasilkan. Berikut adalah hasil simulasi dari emisi generator yang dihasilkan oleh HOMER untuk kedua konfigurasi.

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	2,478,874
Carbon monoxide	6,119
Unburned hydrocarbons	678
Particulate matter	461
Sulfur dioxide	4,978
Nitrogen oxides	54,598

Gambar 4.29 Hasil Simulasi Emisi Konfigurasi Generator 4, PV dan Turbin Angin

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	2,568,655
Carbon monoxide	6,340
Unburned hydrocarbons	702
Particulate matter	478
Sulfur dioxide	5,158
Nitrogen oxides	56,576

Gambar 4.30 Hasil Simulasi Emisi Konfigurasi Generator 4 dan PV

Gambar 4.29 dan Gambar 4.30 diatas menunjukkan emisi yang ditetapkan HOMER atas konfigurasi yang kita masukkan ke dalamnya. Pada konfigurasi PLH yang menggunakan turbin angin, cenderung memiliki emisi berupa CO₂ dan CO lebih kecil dibandingkan dengan emisi yang dihasilkan dari konfigurasi PLH tanpa turbin angin, dengan nilai 2.478.874 kg/tahun untuk CO₂ dan 6.119 kg/tahun untuk emisi berupa CO. Sedangkan untuk konfigurasi PLH tanpa turbin angin memiliki emisi berupa CO₂ sebesar 2.568.655 kg/tahun dan emisi berupa CO sebesar 6.340 kg/tahun. Dengan penurunan yang dilakukan tentu saja akan berdampak baik bagi lingkungan dengan mengurangi jumlah emisi yang dihasilkan terutama untuk jangka waktu yang lama.

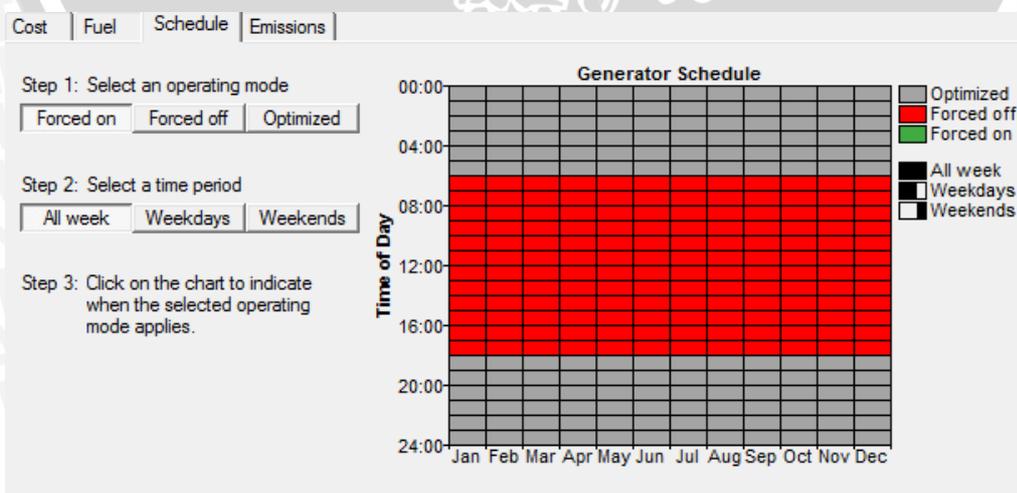
4.3.3 Konfigurasi PLTD, PV dan Energi Terbarukan

Dalam analisis ini berisi konfigurasi dengan menggunakan seluruh komponen PLTD dan energi terbarukan berupa photovoltaic dan turbin angin. Dilakukan juga analisis dengan menggunakan *photovoltaic* saja atau dengan tanpa menggunakan turbin angin agar diketahui sistem terbaik dilihat dari beberapa sudut pandang. Berikut adalah pola operasi yang dirancang agar sistem berjalan optimal.



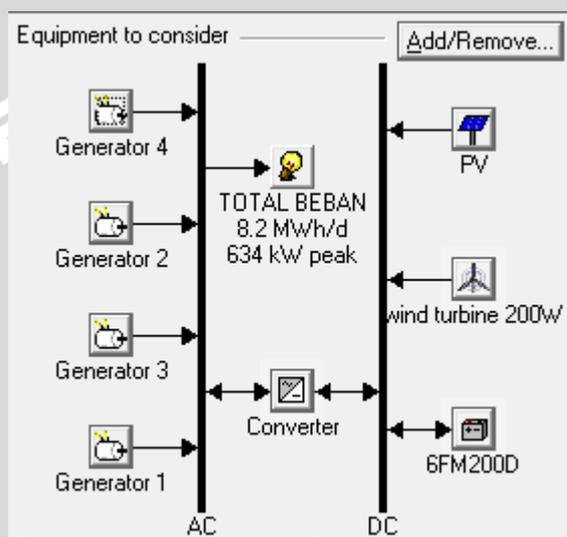
Gambar 4.31 Pola Operasi PLH

Dikarenakan tujuan penggunaan energi terbarukan sebagai back-up pada saat beban dasar, maka untuk generator 4 yang memiliki kapasitas 500 kW, dijadwalkan tidak akan beroperasi saat siang hari atau saat beban dasar berlangsung. Penjadwalan ini terjadi pada saat *photovoltaic* mulai bekerja yaitu pukul 6 pagi sampai dengan saat *photovoltaic* mulai berhenti beroperasi yaitu sekitar pukul 6 sore. Sedangkan untuk turbin angin cenderung tidak dapat diatur kapan beroperasi dan kapan turbin angin tersebut dalam keadaan *standby* disebabkan mengalirnya angin yang tidak tentu.



Gambar 4.32 Penjadwalan Generator 4

Dengan penjadwalan ini berarti bahwa beban pada siang hari akan disuplai oleh generator lain selain generator 4, begitu juga dibantu oleh sumber energi terbarukan *photovoltaic* dan turbin angin. Kembali beroperasinya generator 1,2 dan generator 3, maka *photovoltaic* diatur bekerja tidak dengan kapasitas 300 kW dan dapat menggantinya dengan kapasitas yang lebih kecil. Selain mengingat biaya yang timbul akibat penentuan *photovoltaic* yang cukup besar, ketersediaan akan lahan juga menentukan terciptanya sistem PLH yang bisa diterapkan untuk daerah kepulauan. Dan dengan asumsi kapasitas *photovoltaic* disamakan dengan generator 2,3 dan 4, maka didapatkan konfigurasi sistem dan hasil simulasi HOMER seperti pada Gambar 4.32 dan 4.33 berikut.



Gambar 4.33 Konfigurasi Sistem PLH

	PV (kW)	WT200	gen 4 (kW)	gen 2 (kW)	gen 3 (kW)	gen 1 (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)
	100	150	500	100	100	100	300	150	\$ 443,019	782,992	\$ 9,170,983	0.275	0.09	933,353
	150	150	500	100	100	100	300	150	\$ 253,019	824,921	\$ 9,448,369	0.283	0.04	984,264
	100		500	100	100	100	300	150	\$ 348,519	819,890	\$ 9,487,787	0.285	0.05	973,934
			500	100	100	100	300	150	\$ 158,519	860,803	\$ 9,753,846	0.293	0.00	1,022,254

Gambar 4.34 Hasil Simulasi Konfigurasi Sistem PLH

Pada Gambar 4.33 terlihat konfigurasi ini menggunakan semua komponen yang telah ditentukan pada pembahasan konfigurasi sebelumnya. Hanya saja disini kapasitas *photovoltaic* diasumsikan sama dengan kapasitas milik generator dengan kapasitas 100 kW. Dan kapasitas konverter juga disesuaikan dengan kapasitas *photovoltaic* setelah diturunkan kapasitasnya, yaitu menjadi sebesar 150 kW (sesuai ketersediaan di pasaran).

Sedangkan Gambar 4.34 menjelaskan hasil simulasi yang telah dilakukan oleh HOMER. Dimana konfigurasi dengan menggunakan seluruh komponen menurut HOMER memiliki tingkat efisiensi paling tinggi dilihat dari Total NPC yang dihasilkan. Disusul kemudian konfigurasi-konfigurasi berikutnya dengan atau tanpa menggunakan salah satu dari sumber energi terbarukan. Dalam analisis ini akan diambil 2 hasil simulasi untuk

membandingkan konfigurasi mana yang lebih baik dilihat dari beberapa aspek. Pertama, konfigurasi dengan menggunakan seluruh komponen, dan berikutnya mengambil konfigurasi tanpa menggunakan salah satu komponen sumber energi terbarukan berupa turbin angin.

4.3.3.1 Analisis Kelistrikan

Analisis kelistrikan disini akan membahas hasil simulasi oleh HOMER mengenai peran masing-masing komponen sumber energi listrik dalam menyuplai beban. Berikut ini akan ditampilkan hasil simulasi kelistrikan yang dapat dilihat pada Gambar 4.35.

Production		kWh/yr	%	Consumption		kWh/yr	%	Quantity		kWh/yr	%
PV array		158,944	5	AC primary load		2,991,112	100	Excess electricity		0.383	0.0000
Wind turbines		121,369	4	Total		2,991,112	100	Unmet electric load		64.5	0.0022
Generator 4		1,461,943	49					Capacity shortage		792	0.0265
Generator 2		535,003	18					Quantity			Value
Generator 3		499,768	17					Renewable fraction			0.0931
Generator 1		234,488	8								
Total		3,011,517	100								

Gambar 4.35 Hasil Simulasi *Electricity* Konfigurasi Sistem PLH

Beroperasinya generator 1,2 dan generator 3 dalam memenuhi kebutuhan beban dan turunnya kapasitas *photovoltaic* dalam memberikan sumber energi listrik menjadikan peran masing-masing komponen tersebut berubah. *Photovoltaic* memiliki peran 5% dalam menghasilkan kebutuhan listrik pertahunnya dilihat dari total energi yang dibangkitkan selama satu tahu. Sedangkan untuk masing-masing generator 1,2 dan 3 memiliki peran sebesar 8%, 18% dan 17%. Energi yang dibangkitkan generator tetap menjadi yang paling besar mengingat generator 4 ini berfungsi memasok beban puncak. Namun jika dibandingkan konfigurasi sebelum-sebelumnya, jam operasi generator ini cenderung turun akibat pemakaian energi terbarukan sebagai sumber energi dan beroperasinya generator-generator lain. Generator 4 memiliki peran dalam menghasilkan listrik pertahun sebesar 49% dari total energi yang dibangkitkan oleh sistem.

Kelebihan energi listrik selalu menjadi perhatian yang cukup penting jika kita menggunakan energi terbarukan ke dalam konfigurasi sistem. Kelebihan energi listrik atau *excess electricity* pada konfigurasi ini hanya sebesar 0.383 kWh/tahun atau hampir mendekati 0%. Namun yang menjadi perhatian juga ialah kolom *Capacity Shortage* atau berarti semakin tinggi *capacity shortage* maka banyak beban yang tidak terlayani sehingga kualitas energi yang dihasilkan ialah kurang, namun apabila *capacity shortagenya* kecil berarti sistem termasuk *reliable* dan berkualitas bagus. Disini *capacity shortage* sebesar 792 kWh/tahun atau sebesar 0.0265%.

Production			Consumption			Quantity		
	kWh/yr	%		kWh/yr	%		kWh/yr	%
PV array	158,944	5	AC primary load	2,991,048	100	Excess electricity	0.0835	0.0000
Generator 4	1,603,239	53	Total	2,991,048	100	Unmet electric load	129	0.0043
Generator 2	509,042	17				Capacity shortage	892	0.0298
Generator 3	488,601	16						
Generator 1	256,388	9						
Total	3,016,215	100						

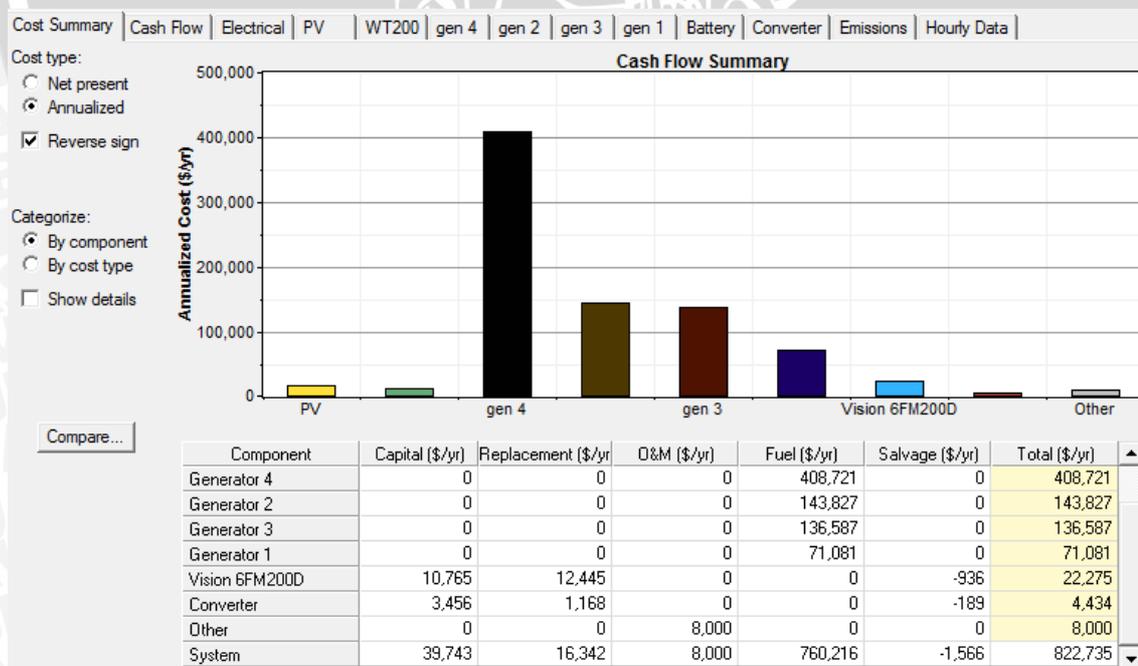
Gambar 4.36 Hasil Simulasi Kelistrikan Sistem PLH Tanpa Turbin Angin

Tidak digunakannya turbin angin sebagai salah satu sumber energi listrik tentu akan membawa perubahan pada masing-masing komponen dalam memberikan energi listrik kepada beban. Terlihat bahwa terjadi pengurangan jam operasi pada generator 2 dan 3 sebanyak 1% dari total energi yang dibangkitkan. Berbeda dengan keadaan tersebut, kenaikan jam operasi terjadi pada generator 4 dan generator 1. Terbukti dengan bertambahnya energi yang dibangkitkan kedua generator tersebut.

Perubahan juga terjadi pada kolom excess electricity, terjadi kenaikan pada kelebihan energi listrik yang dihasilkan oleh sistem menjadi sebesar 0,0835 kWh/tahun. Kenaikan juga terjadi pada kolom capacity shortage menjadi sebesar 892 kWh/tahun atau sebesar 0,0298% pertahunnya.

4.3.3.2 Analisis Ekonomi

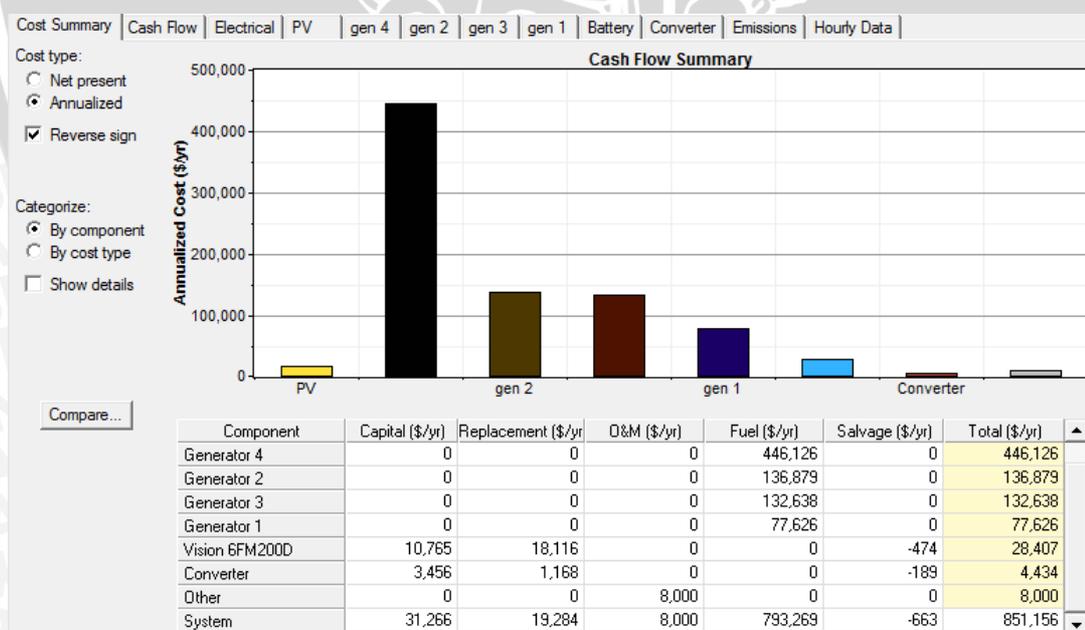
Berkurangnya kapasitas photovoltaic dan beroperasinya generator 1,2 dan 3 tentu saja akan menyebabkan hasil simulasi yang dilakukan HOMER berubah dilihat dari sisi ekonomi. Berikut adalah hasil simulasi yang dilakukan oleh HOMER.



Gambar 4.37 Hasil Simulasi Ekonomi Tahunan Konfigurasi Sistem PLH

Konfigurasi PLH menggunakan semua komponen yang disediakan cenderung memiliki nilai ekonomis yang lebih baik. Baik dari segi *capital cost* yang dibutuhkan sampai Total NPC yang dihasilkan dari keberadaan sistem. *Capital cost* cenderung menurun melihat penurunan kapasitas *photovoltaic* dan konverter yang digunakan pada konfigurasi sistem. *Capital cost* untuk konfigurasi sistem ini menjadi sebesar \$ 443,019 sesuai dengan yang tampak pada Gambar 4.34.

Pemakaian bahan bakar diesel juga cenderung menurun meskipun generator 1,2 dan generator 3 kembali bekerja. Hal ini dikarenakan penggunaan bahan bakar paling banyak dihasilkan oleh generator 4, sehingga penurunan jam operasi pada generator 4 juga akan menurunkan jumlah pemakaian bahan bakar total yang dibutuhkan oleh sistem. Terlihat pada Gambar 4.33 jumlah bahan bakar yang digunakan sistem untuk satu tahunnya sebesar 933.353 liter/tahun atau membutuhkan biaya sebesar \$ 760,216 sesuai dengan yang terlihat pada Gambar 4.37. Penurunan penggunaan bahan bakar ini tentu akan mempengaruhi Total NPC yang dihasilkan oleh sistem. Terbukti dengan Total NPC yang dihasilkan menjadi sebesar \$ 9,170,983 dan biaya yang dihasilkan dari penggunaan bahan bakar memiliki proporsi 92,4% dari Total NPC. Angka tersebut tetap menjadikan bahan bakar sebagai penguras biaya terbanyak untuk konfigurasi sistem PLH yang ditentukan. Dan berikut adalah hasil simulasi ekonomi yang dilakukan HOMER untuk sistem PLH tanpa menggunakan turbin angin.



Gambar 4.38 Hasil Simulasi Ekonomi Tahunan Sistem PLH Tanpa Turbin Angin

Gambar 4.38 menjelaskan biaya yang dibutuhkan masing-masing komponen tiap tahunnya. Terlihat pada grafik di dalam gambar tersebut, generator tetap menjadi faktor

penghasil biaya tertinggi untuk konfigurasi sistem yang ditentukan dengan generator 4 memiliki prosentase paling besar. Melihat dari berkurangnya sumber energi terbarukan yang digunakan, maka *capital cost* yang dibutuhkan juga akan semakin menurun. Terbukti pada Gambar 4.34, biaya *initial capital* yang dihasilkan menjadi sebesar \$ 348,519 atau lebih rendah dibanding dengan *capital cost* yang dibutuhkan sistem PLH dengan menggunakan turbin angin. Namun berkurangnya biaya awal untuk ketersediaan turbin angin, berdampak pada kenaikan bahan bakar yang digunakan oleh generator seiring dengan kenaikan jam operasi dari generator sendiri. Terlihat pada Gambar 4.34 jumlah bahan bakar yang digunakan mencapai 973.934 liter/tahun yang pada akhirnya juga akan berdampak pada kenaikan Total NPC yang dihasilkan oleh sistem.

4.3.3.3 Analisis Lingkungan

Dioperasikannya generator 1,2 dan 3 tentu akan mempengaruhi penggunaan bahan bakar untuk kinerja ketiganya. Dan bahan bakar yang digunakan untuk generator nantinya akan berubah menjadi emisi gas yang dibuang oleh generator, semakin banyak bahan bakar yang dipakai untuk generator bekerja, makin banyak pula emisi gas yang dihasilkan oleh generator. Berikut ini adalah rincian dari hasil simulasi emisi yang dikeluarkan oleh konfigurasi sistem.

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	2,457,825
Carbon monoxide	6,067
Unburned hydrocarbons	672
Particulate matter	457
Sulfur dioxide	4,936
Nitrogen oxides	54,134

Gambar 4.39 Hasil Simulasi Emisi Konfigurasi Sistem PLH

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	2,564,688
Carbon monoxide	6,331
Unburned hydrocarbons	701
Particulate matter	477
Sulfur dioxide	5,150
Nitrogen oxides	56,488

Gambar 4.40 Hasil Simulasi Emisi Sistem PLH Tanpa Turbin Angin

Gambar 4.39 berisi berbagai gas buang yang dihasilkan oleh sistem PLH menggunakan turbin angin. Bekurangnya jam operasi generator 4 dan penggunaan dua sumber energi terbarukan menjadikan emisi yang dikeluarkan sistem turun menjadi 2.457.825 kg/tahun untuk emisi berupa karbon dioksida dan 6.067 kg/tahun untuk emisi berupa karbon monoksida. Nilai ini lebih kecil jika dibandingkan dengan hasil emisi yang

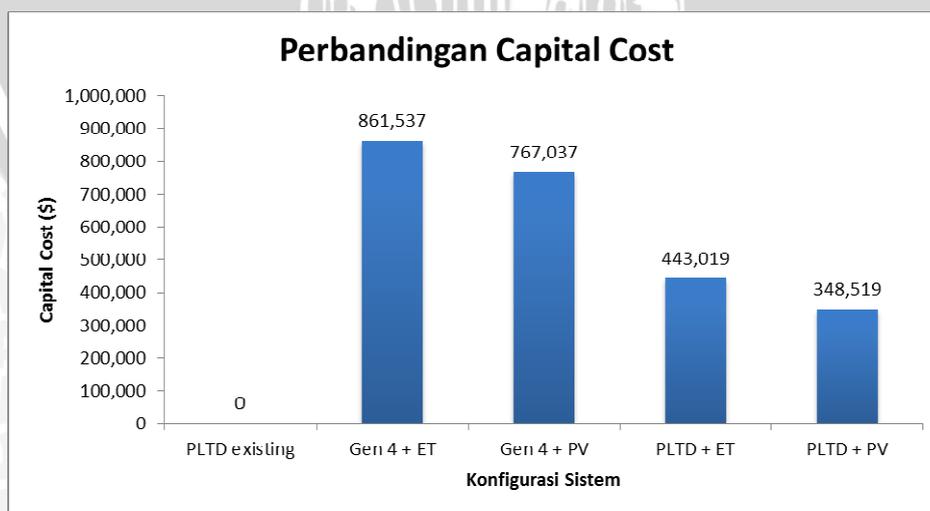
dihasilkan sistem PLH tanpa menggunakan turbin angin sebagai salah satu sumber energi listrik. Seperti yang tertera pada Gambar 4.40, bahwa emisi karbon dioksida sebesar 2.564.688 kg/tahun dan emisi berupa karbon monoksida sebesar 6.331 kg/tahun. Didasari dari penambahan jam operasi pada generator 4 yang memiliki kapasitas paling besar, hal ini sangat dimungkinkan hasil emisi yang dikeluarkan juga semakin besar. Namun dengan adanya penambahan energi terbarukan pada konfigurasi sistem PLTD *existing*, terbukti akan mengurangi jumlah pemakaian bahan bakar dan pengurangan pada emisi yang dikeluarkan mengingat kembali bahwa harga minyak dunia yang semakin lama semakin mahal dan diprediksi bahwa harga minyak dunia akan naik rata-rata dikisaran 5% - 10% pertahun.

4.3.4 Analisis Parameter

Dari hasil simulasi untuk masing-masing konfigurasi yang ditentukan untuk mengoptimasi PLTD *existing* yang telah ada di pulau Mandangin dan telah disimulasi oleh *software* HOMER, maka didapatkan nilai parameter yang berbeda untuk masing-masing konfigurasi sistem yang dibuat. Berikut adalah analisis yang dibuat untuk menentukan konfigurasi yang paling optimal menurut berbagai parameter yang dibuat.

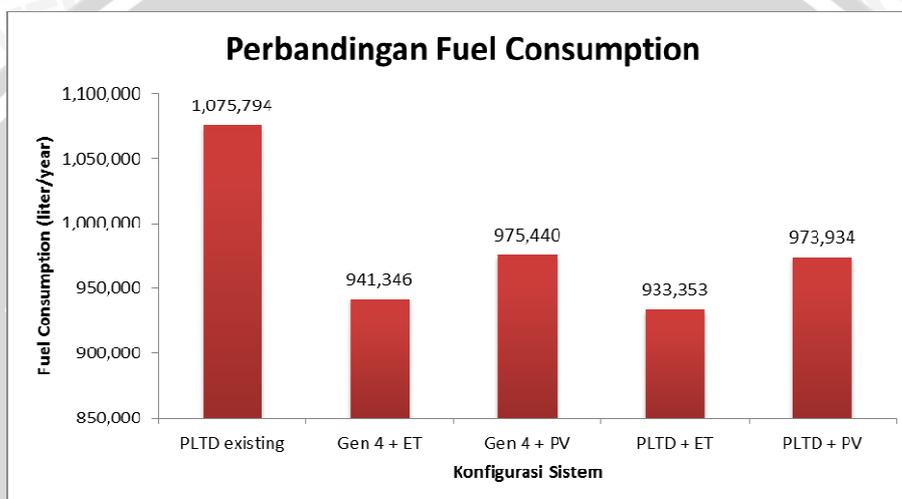
4.3.4.1 Perbandingan Parameter

Dalam analisis ini dilakukan perbandingan parameter yang menjadi hal penting dari hasil simulasi yang dilakukan oleh HOMER. Beberapa parameter ini nantinya akan dibandingkan dengan masing-masing konfigurasi sistem yang telah disimulasi. Berikut beberapa perbandingan parameter untuk menentukan konfigurasi terbaik.



Gambar 4.41 Perbandingan *Capital Cost*

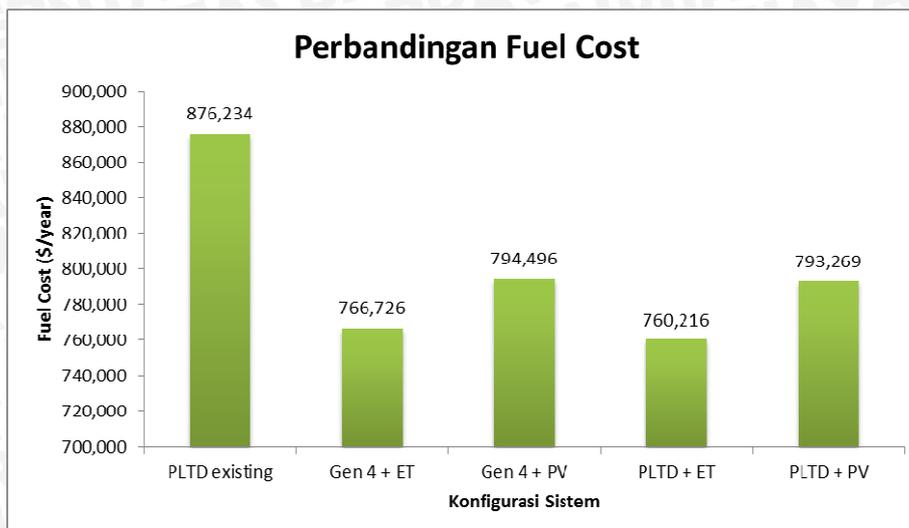
Dari Gambar 4.41 dapat diketahui bahwa biaya awal paling besar terdapat pada konfigurasi Generator 4 dengan sumber energi terbarukan PV dan turbin angin. Hal ini disebabkan peran energi terbarukan sendiri digunakan untuk menggantikan tiga peran generator dengan kapasitas 100 kW. Maka dari itu dibutuhkan sumber energi terbarukan yang sesuai dengan kapasitas generator yang digantikan, dan hal ini akan meningkatkan *capital cost* mengingat kapasitas *photovoltaic* yang digunakan sebesar 300 kW. Disusul dengan konfigurasi Generator 4 dan *photovoltaic*, PLTD dengan ET dan yang terakhir konfigurasi PLTD dengan *photovoltaic*. Meskipun begitu, konfigurasi dengan biaya awal yang besar belum tentu merupakan konfigurasi yang paling buruk untuk diterapkan.



Gambar 4.42 Perbandingan *Fuel Consumption*

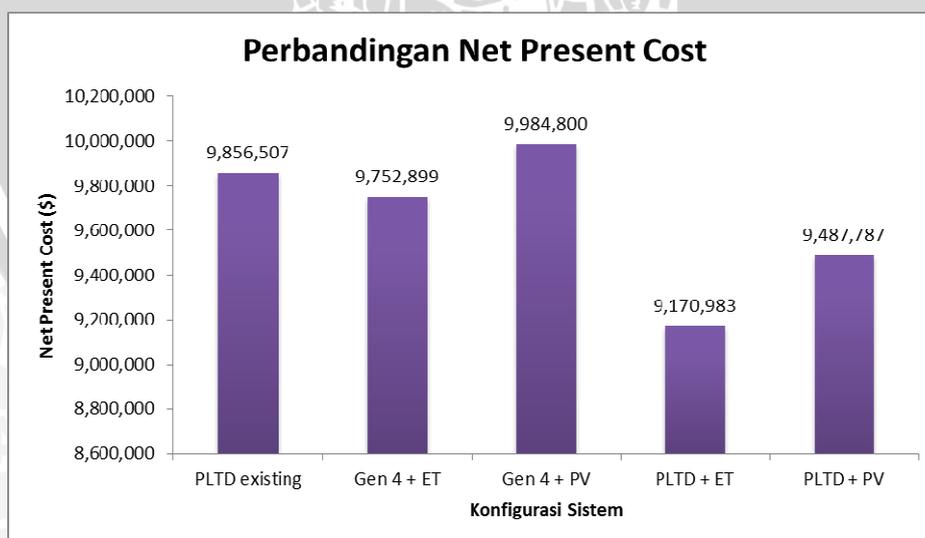
Penggunaan bahan bakar memang tidak luput dari pembangkit listrik yang tidak menggunakan energi terbarukan sebagai salah satu sumbernya. Dan tidak dipungkiri juga pembangkit listrik tenaga diesel menjadi salah satu pembangkit dengan penggunaan bahan bakar terbesar. Maka dari itu tujuan dari skripsi ini juga berisi tentang dukungan terhadap kebijakan yang dikeluarkan pemerintah untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dalam kehidupan sehari-hari. Dan dari perbandingan yang tampak pada Gambar 4.42 diatas, dapat disimpulkan bahwa dengan masuknya energi terbarukan ke dalam sistem PLTD *existing*, mampu mengurangi pemakaian bahan bakar generator.

Konfigurasi hibrida PLTD dengan energi terbarukan tampak pada nilai terendah dalam penggunaan bahan bakar. Disusul dengan konfigurasi hibrida generator 4 dan energi terbarukan. Penurunan ini termasuk cukup besar mengingat komponen energi terbarukan yang dipakai juga cenderung banyak. Namun kaitannya dengan kebijakan pemerintah masalah penekanan penggunaan bahan bakar fosil, konfigurasi hibrida PLTD dan energi terbarukan menjadi konfigurasi dengan penggunaan bahan bakar paling rendah.



Gambar 4.43 Perbandingan *Fuel Cost*

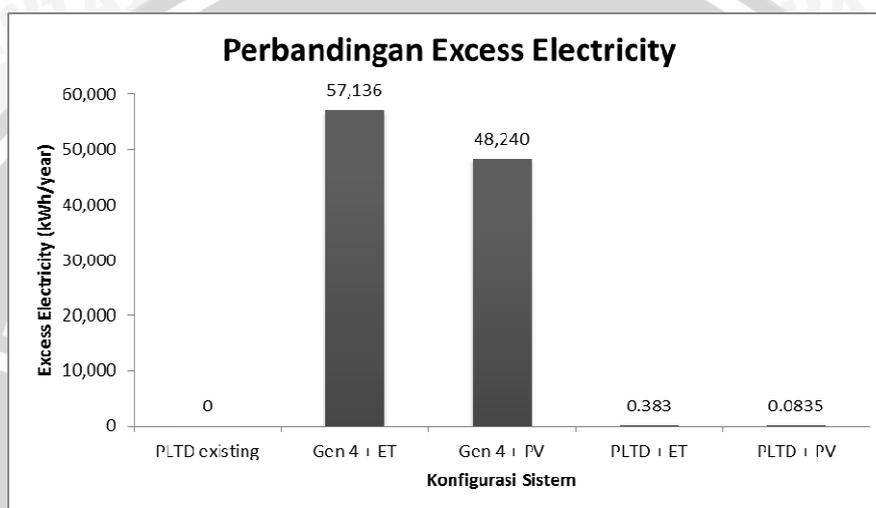
Perbandingan biaya bahan bakar seperti pada Gambar 4.43 ini mengacu pada pemakaian bahan bakar untuk masing-masing konfigurasi. Sama seperti perbandingan sebelumnya, konfigurasi hibrida PLTD dan energi terbarukan menjadi konfigurasi dengan tingkat biaya bahan bakar paling rendah. Disusul kemudian dengan konfigurasi hibrida antara generator 4 dan energi terbarukan. Dan yang telah didapatkan dari hasil simulasi sebelumnya, bahan bakar menjadi parameter tertinggi dalam penentuan biaya yang dihasilkan suatu sistem pembangkit. Dan prosentase biaya bahan bakar pada konfigurasi hibrida PLTD dengan energi terbarukan mencapai 92,4% dari total biaya yang harus dikeluarkan sistem untuk perhitungan selama 25 tahun.



Gambar 4.44 Perbandingan *Net Present Cost*

Nilai NPC (*Net Present Cost*) didapatkan dari total biaya yang dibutuhkan dari awal hingga akhir perhitungan selama 25 tahun. Melihat pada Gambar 4.44, jika membandingkan secara keseluruhan Total NPC dari masing-masing konfigurasi, nilai NPC

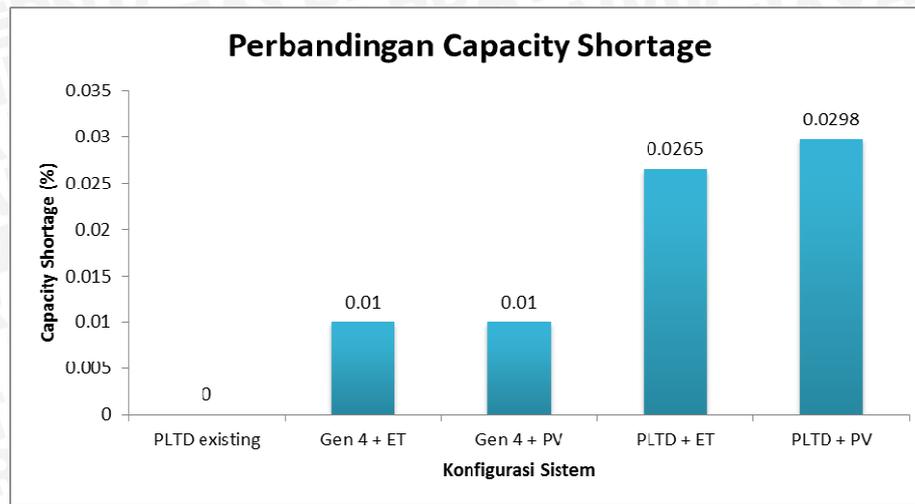
untuk konfigurasi hibrida generator 4 dan photovoltaic menduduki peringkat tertinggi. Hal ini disebabkan berkurangnya sumber energi terbarukan berupa turbin angin sehingga mengakibatkan generator 4 beroperasi lebih lama dibandingkan dengan konfigurasi yang lain. Sedangkan untuk perbandingan dengan Total NPC terendah ada pada konfigurasi hibrida antara PLTD dengan energi terbarukan. Penggunaan generator kapasitas 100 kW pada konfigurasi tersebut mampu mengoptimasi penggunaan generator 4 dengan tidak mengoperasikan generator 4 pada siang hari dimana saat itu beban disuplai oleh energi terbarukan dibantu dengan generator yang lain.



Gambar 4.45 Perbandingan *Excess Electricity*

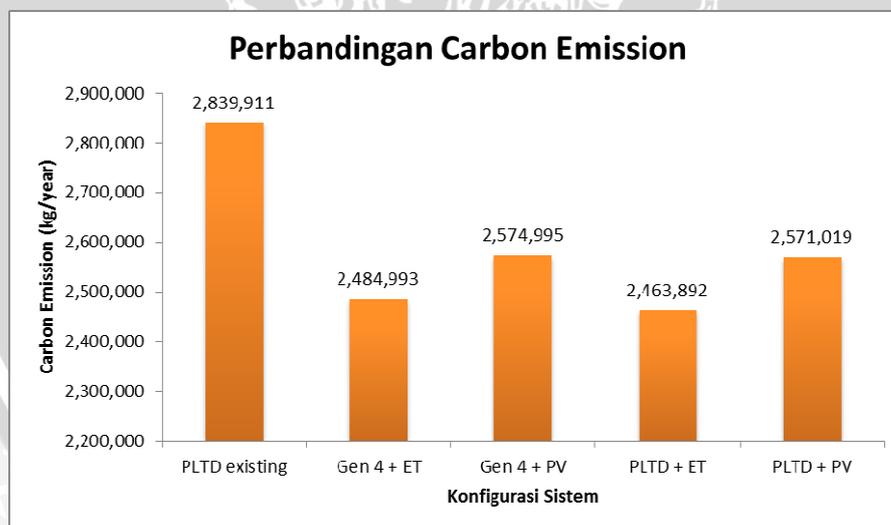
Dari Gambar 4.45 terlihat bahwa tidak terjadi kelebihan energi yang dihasilkan oleh konfigurasi PLTD *existing*. Hal ini dikarenakan generator bekerja sesuai dengan kebutuhan beban akan energi listrik. Namun jika kita melihat grafik yang dihasilkan oleh konfigurasi hibrida generator 4 dengan energi terbarukan, terdapat nilai *excess electricity* yang cukup besar yaitu 57,316 kWh/tahun. masalah ini sebenarnya dapat teratasi dengan cara menambahkan baterai pada konfigurasi sistem.

Kelebihan energi listrik ini sebenarnya cukup menjadi perhatian untuk sistem PLH, mengingat efisiensi dari komponen penyedia energi listrik dari energi terbarukan cenderung kecil. Untuk itu sedapat mungkin kelebihan energi yang dihasilkan dari konfigurasi sistem digunakan untuk keperluan lain atau dengan menyimpannya ke dalam baterai. Dan dari perbandingan kelebihan energi listrik pada Gambar 4.45 didapatkan bahwa konfigurasi hibrida antara PLTD dengan *photovoltaic* memiliki nilai *excess electricity* paling rendah mengingat kemungkinan PLTD menghasilkan *excess electricity* sangatlah kecil.



Gambar 4.46 Perbandingan *Capacity Shortage*

Capacity shortage merupakan banyaknya beban yang tidak tersuplai oleh sumber energi, dan apabila nilai ini semakin besar, maka kualitas energi yang dihasilkan bisa dikatakan kurang. Namun jika nilai *capacity shortage* yang dihasilkan semakin kecil, maka sistem termasuk *reliable* dan berkualitas bagus. Dan menurut hasil simulasi yang dihasilkan HOMER pada Gambar 4.46, *capacity shortage* yang didapatkan dari perhitungan konfigurasi sangat kecil. Hal ini berarti hampir semua konfigurasi cenderung menjadi konfigurasi yang layak dilihat dari parameter ini.



Gambar 4.47 Perbandingan *Carbon Emission*

Gambar 4.47 menjelaskan perbandingan jumlah emisi dari CO₂ dan CO yang dihasilkan oleh masing-masing konfigurasi. Konfigurasi dari PLTD *existing* menghasilkan emisi paling banyak dibandingkan dengan konfigurasi lainnya. Dan yang menghasilkan emisi terendah ada pada konfigurasi hibrida antara PLTD dengan energi terbarukan. Dari perbandingan ini dapat terbukti bahwa pemakaian energi terbarukan sebagai pembangkit

listrik memiliki dampak positif bagi lingkungan disekitarnya. Selain ramah lingkungan, tidak menghasilkan polusi suara dan terlebih lagi mampu mengurangi dampak pencemaran udara sekitar dengan mengurangi emisi yang dikeluarkan oleh generator. Dan yang kita tahu bahwa dampak dari emisi karbon akan sangat berbahaya bila dibiarkan dalam jangka waktu yang sangat lama.

4.3.4.2 Variabel Sensitifitas

Analisis sensitifitas ditujukan untuk mengetahui pengaruh dari beberapa parameter terhadap keberjalanan sistem. Sensitifitas yang diberikan berupa kemungkinan terjadinya beberapa hal di tahun-tahun mendatang. Berikut akan dilakukan penambahan sensitifitas terhadap konfigurasi sistem agar melihat pengaruhnya terhadap keandalan sistem. sensitifitas yang akan diberikan terkait dengan beban yang terus bertambah serta terkait dengan perkiraan kenaikan bahan bakar.

1. Sensitifitas Harga BBM Terhadap *Net Present Cost* (NPC)

Pada sensitifitas ini dilihat apa pengaruh perubahan suku bunga terhadap konfigurasi sistem. Parameter yang dilihat disini adalah *Net Present Cost* dari semua konfigurasi yang akan disimulasikan oleh HOMER. Melihat *track record* harga bahan bakar dari tahun ketahun didapatkan bahwa harga bahan bakar mengalami kenaikan dalam 10 tahun terakhir. Dengan asumsi harga BBM di Indonesia mengalami kenaikan sebesar 5% dan 10% maka hasil sensitifitas terhadap parameter terkait dapat dilihat pada Tabel 4.11 dibawah.

Tabel 4.11 Sensitifitas Harga BBM Terhadap Parameter NPC

Konfigurasi Sistem	PLTD existing	Gen 4 + ET	Gen 4 + PV	PLTD + ET	PLTD + PV
Net Present Cost (\$)	9,856,507	9,752,899	9,984,800	9,170,983	9,487,787
Net Present Cost (\$) dengan kenaikan harga BBM 5%	10,338,578	10,177,413	10,424,573	9,592,243	9,927,268
Net Present Cost (\$) dengan kenaikan harga BBM 10%	10,826,644	10,595,721	10,859,166	10,007,999	10,361,247

Secara umum nilai NPC akan naik seiring dengan meningkatnya proporsi penggunaan PLTD. Begitu juga dengan meningkatnya harga bahan bakar yang dimana digunakan untuk mengoperasikan PLTD. Sehingga kenaikan sedikit saja pada harga BBM akan sangat mempengaruhi nilai NPC yang dihasilkan. Mengingat kenaikan bahan bakar ini sangat mungkin terjadi dilihat dari ketersediaan minyak bumi yang semakin lama semakin menipis. Disinilah kelebihan peran energi terbarukan dilihat dari sisi NPC yang dihasilkan, bahwa dengan memasukkan energi terbarukan ke dalam konfigurasi sistem PLTD mampu mengurangi penggunaan bahan bakar serta biaya yang dikeluarkan untuk itu.

2. Sensitifitas Kenaikan Beban Terhadap *Capacity Shortage*

Capacity shortage merupakan hal yang sering terjadi di dalam penggunaan energi terbarukan sebagai sumber energi listrik baik dalam bentuk *stand alone* maupun yang dihibrida dengan generator. Dan sangat menjadi perhatian karena semakin tingginya nilai *capacity shortage* maka kelayakan suatu sistem pembangkit menjadi berkurang. Dengan asumsi batasan *capacity shortage* maksimal adalah 2%, hal ini berarti sistem dengan proporsi *capacity shortage* melebihi nominal 2% maka sistem tersebut tidak layak untuk dibuat. Sistem akan diberi sensitifitas berupa kenaikan beban sebesar 5% dan 10% dari beban nominal. Berikut hasil sensitifitas dengan parameter *capacity shortage* menjadi acuan.

Tabel 4.12 Sensitifitas Kenaikan Beban Terhadap *Capacity Shortage*

Konfigurasi Sistem	PLTD existing	Gen 4 + ET	Gen 4 + PV	PLTD + ET	PLTD + PV
Capacity Shortage (%/tahun)	0	0.01	0.01	0.0265	0.0298
Capacity Shortage dengan kenaikan beban 5% (%/tahun)	0	0.03	0.3	0.065	0.073
Capacity Shortage dengan kenaikan beban 10% (%/tahun)	0	0.06	0.07	0.135	0.19

Dari Tabel 4.12 diatas dapat disimpulkan bahwa dengan bertambahnya beban maka nilai *capacity shortage* juga akan bertambah besar. Dengan catatan tidak ada penambahan komponen pembangkit lainnya seperti sumber energi listrik dan juga penambahan baterai.

Dari batasan *capacity shortage* yang telah ditentukan sebelumnya, maka seluruh konfigurasi memiliki tingkat kualitas pelayanan energi cukup baik karena tidak ada salah satu dari konfigurasi yang melewati batas yang telah ditentukan. Keandalan sistem akan sangat berpengaruh pada pelayanan energi kepada konsumen, semakin baik pelayanan tentu akan menjadikan sebuah sistem semakin layak untuk dibuat. Dengan kenaikan yang terjadi sebesar 5% dan 10%, tidak terlalu berpengaruh terhadap kenaikan konfigurasi yang ditentukan. Hal ini akan sangat berbeda hasilnya jika penambahan beban diiringi dengan penurunan sistem dalam memenuhi kebutuhan beban akan energi listrik.

4.3.4.3 Penentuan Konfigurasi

Analisis ini berfungsi untuk menyimpulkan konfigurasi mana yang paling baik menurut parameter yang telah dibandingkan pada pembahasan sebelumnya, berupa *capital cost*, *net present cost*, *fuel consumption and cost* serta *carbon emission* yang dihasilkan

oleh masing-masing konfigurasi sistem. Dari analisis parameter serta pemberian variabel sensitifitas yang dilakukan sebelumnya, maka didapatkan hasil analisis seperti berikut.

1. Semakin besar penggunaan energi terbarukan yang diberikan ke dalam sistem, maka *capital cost* yang dihasilkan sistem juga akan semakin tinggi.
2. Semakin rendah nilai NPC yang dihasilkan sistem, maka sistem bekerja lebih efisien mengingat biaya terbesar didapat dari biaya bahan bakar.
3. Semakin besar proporsi energi terbarukan, maka penggunaan bahan bakar dan biaya yang dikeluarkan untuk pembelian bahan bakar akan semakin kecil.
4. Semakin tinggi penggunaan bahan bakar yang dilakukan oleh sistem, maka emisi karbon yang dihasilkan oleh sistem juga semakin besar.

Analisis diatas menunjukkan peran energi terbarukan kaitannya dengan dampak ekonomi yang dihasilkan oleh keberadaan sistem yang dibuat. Bukan berarti semakin banyak komponen energi terbarukan yang digunakan akan menjadikan sistem lebih baik jika dilihat dari biaya awal yang dibutuhkan serta lahan yang digunakan. Untuk itulah HOMER berfungsi untuk menentukan konfigurasi terbaik apabila dilihat dari Total NPC yang dihasilkan. Jika dilihat dari semua analisis yang telah dilakukan, maka konfigurasi dengan NPC terendah adalah konfigurasi dengan hibrida antara PLTD dan energi terbarukan berupa photovoltaic dan turbin angin. Hal ini dipengaruhi oleh penjadwalan yang ditentukan untuk generator 4 yang dimana memiliki kapasitas paling besar.

Adanya keterbatasan akses BBM ke pulau Mandangin dan sering terlambatnya pasokan BBM, semakin memperkuat alasan penggunaan energi terbarukan sebagai sumber energi listrik. Ketergantungan akan ketersediaan terhadap BBM mampu dikurangi sehingga masalah yang timbul seperti kelangkaan BBM, keterlambatan pasokan BBM serta kenaikan harga BBM tidak banyak mempengaruhi ketersediaan listrik di pulau Mandangin. Begitu juga dengan kebijakan pemerintah untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi juga dapat terlaksana.