

Analisis Probabilistik Terhadap Energi Yang Dibangkitkan Oleh Solar Photovoltaic Pada Daerah Berbeda Iklim

Nazaroni Parapat¹, Charles OP Marpaung², Eva Magdalena Silalahi³, Robinson Purba⁴

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro FT UKI, ²Dosen Program Studi Magister Teknik Elektro PPs UKI, ^{3,4}Dosen Program Studi Teknik Elektro FT UKI

E-mail: parapatroni@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisa energi yang dibangkitkan oleh solar photovoltaic (pv) dengan pendekatan probabilistik di lima daerah yang berbeda keadaan iklimnya di Indonesia. Ke lima daerah ini mewakili semua daerah yang ada di Indonesia. Metode yang digunakan adalah metode Monte Carlo Simulation (MCS). Aplikasi yang digunakan pada penelitian ini adalah @RISK Risk Analysis Project Model. Variabel tak tentu (random variable) yang diperhitungkan dalam penelitian ini adalah suhu rata-rata, lama penyinaran matahari dan radiasi matahari, karena ketiga variabel ini bersifat fluktuatif sehingga masing-masing variabel mempunyai fungsi distribusi. Dalam penelitian ini masing-masing variabel didekati dengan fungsi distribusi uniform. Dari hasil yang diperoleh dapat dilihat bahwa energi tertinggi yang dibangkitkan oleh solar pv dengan kapasitas 100Wp ada pada Kota Surabaya yaitu sebesar 229.73 kWh dalam satu tahun dengan probabilitas 35%. Energi yang dibangkitkan oleh solar pv pada Kota Surabaya tersebut identik dengan capacity factor sebesar 26.22%. Sementara Kabupaten Sorong untuk kapasitas solar pv yang sama 100 Wp, energi yang dibangkitkan adalah sebesar 179.29 kWh dengan probabilitas 31% dan capacity factor 20.47%. Energi yang dibangkitkan di Kabupaten Sorong ini adalah sekitar 78% dari energi yang dibangkitkan di Kota Surabaya. Kabupaten Manggarai untuk kapasitas solar pv yang sama 100 Wp, energi yang dibangkitkan adalah sebesar 178.54 kWh dengan probabilitas 43% dan capacity factor 20.38%. Energi yang dibangkitkan di Kabupaten Manggarai ini adalah sekitar 99% dari energi yang dibangkitkan di Kabupaten Sorong dan sekitar 77% dari energi yang dibangkitkan di Kota Surabaya. Dari hasil ini dapat dilihat bahwa faktor suhu, lama penyinaran matahari dan radiasi matahari sangat menentukan energi yang dapat dibangkitkan oleh solar pv. Jadi jika ingin membangun suatu instalasi suatu solar pv, harus memperhatikan variabel-variabel tersebut agar energi yang diinginkan tercapai.

Kata kunci: (energi surya, photovoltaic, simulasi monte carlo, iklim)

ABSTRACT

This study analyzes the energy generated by solar PV with probabilistic approach in five different climatic conditions in Indonesia. These five regions represent all regions in Indonesia. The method used is Monte Carlo Simulation (MCS). Application that used in this research is the @RISK Risk Analysis Project Model. The random variables were taken into account in this study are the ambient temperature, the duration of sun exposure and solar radiation. Because it's third this variable fluctuates, then each variables has a distribution function. In this study each variable is approached with a distribution



function uniform. From the results obtained it can be seen that the highest energy that can be generated by solar PV with capacity 100 Wp is Surabaya City with 229.73 kWh energy generated in one year with 35% probability. Energy generated by solar PV in Surabaya is identical with capacity factor 26.22%. While Sorong Regency with same solar PV capacity 100 Wp, the energy generated is 179.29 kWh with probability 31% and capacity factor 20.47%. Energy generated in Sorong Regency has around 78% of the energy generated in Surabaya City. While Manggarai Regency with same solar PV capacity 100 Wp, the energy generated is 178.54 kWh with probability 43% and capacity factor 20.38%. Energy generated in Manggarai Regency has around 99% of Sorong Regency and around 77% of Surabaya City. From these result it can be seen that ambient temperature, the duration of sun and solar radiation factor determines the energy that can be generated by solar PV. So when people when to build an installation of solar PV, have to observe these variables so that the desired energy is achieved.

Keywords: (solar energy, photovoltaic, monte carlo simulatuion, climate)

PENDAHULUAN

Ketersediaan energi di Indonesia menjadi kunci utama pembangunan energi nasional. Menurut Dewan Energi Nasional, ketahanan energi adalah suatu kondisi terjaminnya ketersediaan energi, akses masyarakat terhadap energi pada harga yang terjangkau dalam jangka panjang dengan tetap memperhatikan perlindungan terhadap lingkungan hidup. Tetapi saat ini ketercukupan energi di Indonesia sedang dalam kondisi yang tidak baik. Data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menyatakan, sebanyak 41% kebutuhan energi disuplai dari minyak bumi, disusul 29% batubara dan 23% gas bumi[1]. Data tersebut menunjukkan bahwa Indonesia masih sangat bergantung pada energi fosil sebagai penopang kebutuhan energi bangsa. Negara dalam kondisi krisis energi, berdasarkan data dari kementerian yang sama, ketercukupan energi fosil ini juga hanya akan cukup untuk 11 tahun lagi, yang artinya ketercukupan energi di Indonesia sedang dalam masa krisis. Untuk mengantisipasi masalah krisis energi ini, Negara melakukan tindakan dengan membuat Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)[2].

Energi terbarukan merupakan energi yang berasal dari proses alam yang berkelanjutan. Secara umum, energi terbarukan dapat diartikan sebagai sumber energi yang dapat dengan cepat dipulihkan kembali secara alami dan prosesnya berkelanjutan. Dengan definisi ini, maka dipastikan energi fosil dan nuklir tidak termasuk di dalamnya. Dari definisi tersebut juga, energi

terbarukan sudah pasti juga merupakan energi berkelanjutan karena senantiasa tersedia di alam dalam waktu yang relatif sangat panjang sehingga ketersediaan sumber energinya tidak perlu dikhawatirkan. Ada beberapa sumber utama energi terbarukan yaitu energi air, angin, panas bumi, surya, dan biomassa. Dalam perjalanan pengembangan energi terbarukan, dalam bentuk penelitian, ditemukan variable renewable energy (variabel energi terbarukan) yang tidak dapat dipastikan karena sifatnya yang fluktuatif[3]. Sumber-sumber energi ini tidak dapat dikontrol karena sifat energi ini berubah-ubah seperti energi angin dan energi surya yang juga masih merupakan bagian dari energi terbarukan. Salah satu sumber energi terbarukan yang sangat potensial dan prospektif di Indonesia adalah energi surya. Data dari Rencana Umum Energi Nasional 2015-2025 (RUEN) menyebutkan potensi teknis surya secara nasional (34 provinsi) mencapai 207.898 MW yang menjadikan sumber energi terbarukan ini paling potensial diantara sumber energi terbarukan lainnya. Energi air dengan potensi sebesar 75.091 MW, bayu sebesar 60.647 MW, bioenergi sebesar 32.653 MW, minihidro dan mikrohidro sebesar 19.385 MW dan panas bumi sebesar 11.998 MW[2]. Potensi energy surya secara keseluruhan dalam jangka waktu yang lebih panjang pun sangat besar jumlahnya, yaitu di atas 1 terrawatt (TW). Tetapi jumlah tersebut masih belum dimanfaatkan secara optimal, karena data menyebutkan kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebesar 12,1 MW, masih relatif



rendah jika dibandingkan dengan potensi yang tersedia yang tersebar di seluruh wilayah Indonesia.

Penelusuran kepustakaan memperlihatkan, bahwa penelitian terhadap potensi energy surya, antara lain dilakukan oleh Wajid Muneer dan kawan kawan, anggota IEEE yang membahas tentang “Large-scale Solar PV Investment Models, Tools and Analysis: The Ontario Case” dengan menggunakan metode deterministik dan probabilistik dan rencana investasi Solar PV dengan studi kasus di Negara bagian Ontario di Amerika Serikat[4]. Penelitian berikutnya dilakukan oleh Suriadi dan Mahdi Syukri dengan judul “Perencanaan Pembangkit Tenaga Listrik Surya (PLTS) Terpadu Menggunakan Software PVSYST Pada Komplek Perumahan di Banda Aceh” menjelaskan energi yang dihasilkan modul surya perhari tergantung pada radiasi matahari dimana untuk radiasi tertinggi menghasilkan energi sebesar 65928Wh dan insolasi terendah menghasilkan energi 29260Wh yang akan mampu melayani 10 rumah di suatu perumahan di daerah Banda Aceh[5]. Penelitian yang dilakukan oleh Romi Wiryadinata dan kawan kawan yang membahas tentang “Studi Pemanfaatan Energi Matahari di Pulau Panjang Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif” menjelaskan bahwa energi surya dari solar photovoltaic dengan kapasitas 153,89 kWp dapat menghasilkan energi 164684 kWh/tahun[6].

LANDASAN TEORI

Energi surya adalah energi yang berupa sinar dan panas serta radiasi dari matahari. Energi ini dapat dimanfaatkan dengan menggunakan serangkaian teknologi salah satunya solar photovoltaic. Teknologi energi surya secara umum dikategorikan menjadi dua kelompok, yakni teknologi pemanfaatan pasif dan teknologi pemanfaatan aktif. Pengelompokan ini tergantung pada proses penyerapan, pengubahan, dan penyaluran energi surya. Contoh pemanfaatan energi surya secara aktif adalah penggunaan solar photovoltaic dan panel penyerap panas. Contoh pemanfaatan energi surya secara pasif adalah dengan mengarahkan bangunan ke arah matahari, memilih bangunan dengan massa termal atau kemampuan dispersi cahaya yang baik dan merancang ruangan dengan sirkulasi udara alami.

Penelitian yang dilakukan, didasarkan kepada kategori pemanfaatannya yaitu, menggunakan pemanfaatan secara aktif dengan solar photovoltaic sebagai teknologi untuk melakukan proses penyerapan, pengubahan, dan penyaluran energi surya.

Jika pada penelitian oleh Romi Wiryadinata hanya meneliti pemanfaatan energi surya pada satu daerah dan penelitian oleh Suriadi dan Mahdi Syukri hanya menggunakan satu variabel (insolasi matahari) dalam perhitungan perencanaan pembangkitan energi surya dan hanya melihat hasil tertinggi dan terendah, maka dalam penelitian ini yang dilakukan adalah penelitian pada beberapa daerah dengan iklim yang berbeda di Indonesia, dengan berfokus kepada tiga variabel yang fluktuatif dan berbeda-beda pada setiap daerah (suhu rata-rata, lama penyinaran matahari dan radiasi matahari). Dalam perhitungan pembangkitan energi surya digunakan metode probabilistik untuk menganalisa kemungkinan-kemungkinan energi yang dibangkitkan oleh solar pv dengan melihat perbedaan iklim di Indonesia. Adapun lokasi untuk penelitian ini adalah daerah-daerah di Indonesia yang memiliki perbedaan iklim merujuk kepada data dari BMKG khususnya perubahan suhu. Daerah-daerah dengan iklim yang berbeda tersebut adalah Kota Pekanbaru, Kota Surabaya, Kabupaten Manggarai, Kabupaten Sorong dan Kabupaten Barito Selatan.

Melalui penelitian ini dapat diketahui jumlah energi yang dibangkitkan secara probabilistik dan lebih terukur, serta capacity factor dan dengan demikian, sehingga luas daerah dan jumlah solar pv yang dibutuhkan dapat diketahui lebih pasti dan menjadi acuan awal dalam perencanaan pembangunan pembangkit listrik tenaga surya.

METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif dengan melakukan perhitungan energi yang dibangkitkan oleh solar pv. Perhitungan besar energi surya dilakukan berdasarkan variable tentu dan variable tidak tentu. Variabel tentu adalah karakteristik solar pv meliputi kapasitas solar pv, efisiensi modul solar pv dan sebagainya. Variabel tak tentu adalah karakteristik iklim meliputi suhu rata-rata, lama penyinaran matahari dan radiasi matahari yang dioperasionalkan untuk

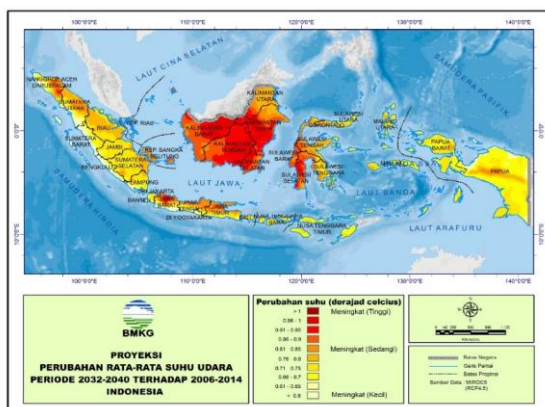


mendapatkan jumlah energi yang dibangkitkan lalu dianalisis secara probabilistik. Seluruh wilayah Indonesia ini merupakan populasi dalam penelitian ini. Tetapi karena populasi yang sangat besar, maka dilakukan penarikan sampel yang mengacu kepada data BMKG tentang proyeksi perubahan suhu sehingga melalui penarikan sampel ditentukan daerah-daerah untuk dilakukan penelitian yaitu, Kota Pekanbaru, Kota Surabaya, Kabupaten Manggarai, Kabupaten Sorong, Kabupaten Barito Selatan. Data yang diperoleh dari BMKG kemudian diolah, dianalisa dengan menggunakan aplikasi komputer @RISK[7].

HASIL PENELITIAN DAN ANALISIS

A. Karakteristik Iklim di Indonesia

Iklim adalah peluang statistik keadaan cuaca rata-rata atau keadaan cuaca jangka panjang pada suatu daerah, meliputi kurun waktu beberapa bulan atau beberapa tahun. Berdasarkan data dari Pusat Perubahan Iklim dan Kualitas Udara dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), dapat dilihat informasi proyeksi perubahan parameter suhu untuk seluruh wilayah Indonesia. Informasi disediakan dalam bentuk peta yang antar periode (2006-2014 dan (2031-2040). Berikut contoh informasi yang tersedia dan disajikan dalam bentuk peta seperti terlihat pada gambar 1.



Gambar 1. Proyeksi Rata-rata Suhu Udara Indonesia

Dari data pada gambar 1, BMKG membagi perubahan suhu rata-rata ke dalam 10 parameter seperti diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Perubahan Suhu

Perubahan Suhu (derajat celcius)	
>1	Meningkat (Tinggi)
0.96-1	
0.91-0.95	
0.86-0.9	Meningkat (Sedang)
0.81-0.85	
0.76-0.8	
0.71-0.75	
0.66-0.7	Meningkat (Kecil)
0.61-0.65	
<0.6	

Dalam penelitian ini difokuskan pada 5 daerah dengan mengambil interval yang cukup besar yang mewakili setiap parameter dari data tersebut. Berdasarkan data pada tabel 1, maka dipilih 5 daerah mewakili perubahan suhu rata-rata yang dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Daerah berdasarkan Parameter Perubahan Suhu

Perubahan Suhu (derajat celcius)	
>1	Kab. Barito Selatan
0.96-1	Kota Surabaya
0.91-0.95	
0.86-0.9	Kota Pekanbaru
0.81-0.85	
0.76-0.8	Kab. Sorong
0.71-0.75	
0.66-0.7	Kab. Manggarai
0.61-0.65	
<0.6	

B. Karakteristik Solar PV

Karakteristik solar pv yang diperoleh dari PT. Jaya Cipta Alamsemesta (Jatas), diperlihatkan pada tabel 3.

Tabel 3. Data Pasti (Input tetap)



Karakteristik	Angka
Kapasitas Total Solar PV	0.0001 MW
Luas Modul Solar PV	0.77m ²
Nilai Daya Solar PV	0.077 kW
Efisiensi Solar PV	12.96%
Jumlah jam per bulan	(24 x jlh hari) jam
Efisiensi Inverter	90%

C. Data Suhu Rata-rata dan Lama Penyinaran Matahari

Berdasarkan data dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), diperoleh karakteristik terkait iklim yang terdiri dari suhu rata-rata (T_i) dan lama penyinaran matahari ($N_{d,m}$) yang akan digunakan dalam perhitungan dengan model matematis dan hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Data Cuaca dan Iklim di 5 Daerah berdasarkan Data BMKG

Bulan	Pekanbaru		Surabaya		Manggarai		Sorong		Barito Selatan	
	Ti	N _{d,m}	Ti	N _{d,m}	Ti	N _{d,m}	Ti	N _{d,m}	Ti	N _{d,m}
Januari	26.82	4.67	28.09	4.14	20.67	3.9	27.12	5.4	26.82	3.95
Februari	26.61	1.97	27.93	4.03	19.85	3.9	27.29	4.94	27.04	3.83
Maret	26.99	3.99	28.37	4.73	20.21	3.98	27.1	4.52	26.7	3.48
April	27.36	5.11	28.61	5.31	20.25	5.38	27.42	5.41	27.18	4.1
Mei	27.72	4.06	28.76	7.05	19.92	5.53	27.39	5.4	27.61	4.63
Juni	27.71	4.98	28.02	6.15	19.02	4.86	26.56	4.5	27.18	4.53
Juli	27.63	5.75	27.72	7.66	18.58	5.35	26.39	4.27	26.89	3.85
Agustus	27.27	5.06	28.02	8.37	18.45	4.45	26.66	5.89	26.81	3.52
September	27.05	3.26	29.13	7.96	19.86	5.89	26.43	2.88	27.69	4.65
Oktober	27.85	4.89	30.39	7.02	20.87	5.39	27.58	5.72	27.54	4.94
November	26.83	3.74	28.92	3.77	20.75	3.84	27.62	5.75	27.06	4.09
Desember	27.1	4.2	28.55	3.55	20.48	3.2	27.55	4.9	27.04	4.06

C. Perhitungan Energi

Berdasarkan data-data cuaca dan iklim di lima daerah, dapat ditentukan jumlah energi yang dibangkitkan oleh solar pv dengan menggunakan rumus energi (model matematis) pada persamaan di bawah ini:

$$E_{k,i}^{PV} = 8760 Cap_{k,i}^{PV} \frac{(AI_i \left[1 - 0.0042 \left(\frac{I_i}{18} + T_i - 20 \right) \eta_o \eta_{inv} \right]) \times n_{d,m}}{Pr \times n_m}$$

Dengan memasukkan nilai dari data-data karakteristik solar pv dan karakteristik iklim ke rumus (model matematis) untuk menghitung energi yang dibangkitkan, maka diperoleh besar energi yang dibangkitkan pada lima daerah dalam satu tahun seperti terlihat pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Energi yang dibangkitkan di lima daerah berdasarkan Perhitungan Model Matematis

Bulan	Energi yang dibangkitkan (kWh)				
	Pekanbaru	Surabaya	Manggarai	Sorong	Barito Selatan
Januari	15.88	14.88	14.07	17.13	12.99
Februari	5.26	11.50	9.86	13.12	10.59
Maret	11.75	16.53	14.14	14.83	11.07
April	12.31	17.35	17.76	16.59	12.13
Mei	12.39	24.56	19.08	15.25	13.61
Juni	13.06	20.12	15.64	13.34	14.40
Juli	14.94	25.08	17.58	13.10	12.21
Agustus	14.31	26.44	10.56	17.38	12.39
September	1.07	25.93	18.61	7.92	14.75
Oktober	15.45	23.49	18.51	18.09	17.31
November	12.31	12.29	12.08	17.61	12.56
Desember	12.84	11.98	10.64	14.94	13.78
Total	141.59	229.73	178.54	179.29	157.80

D. Perhitungan Secara Probabilistik

Untuk memperoleh hasil perhitungan secara probabilistik terhadap data-data di atas, maka dilakukan pendekatan perhitungan dengan menggunakan software @RISK. Perhitungan dengan menggunakan @RISK dilakukan pada lembar kerja Microsoft Excel yang juga digunakan sebagai lembar perhitungan energi yang dibangkitkan seperti diperlihatkan pada gambar 2.

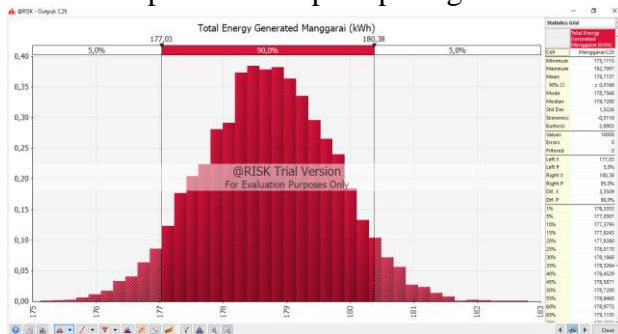


Kab. Manggarai													
1	Known inputs												
2													
3													
4													
5	Total Solar PV Capacity (MW)	0,0001											
6	Solar PV Module Area (m ²)	0,77											
7	Solar PV Module Efficiency (%)	0,1296											
8	Rated Power of Solar PV Model (kW)	0,077											
9	Inverter Efficiency (%)	0,90											
10													
11	Uncertain inputs												
12	Zonal Ambient Temperature (°C)	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
13	Number of daylight hours per month (hrs)	121	99,6	121,4	137,5	163,6	198	149,9	90	164,8	199,3	107,4	
14	Zonal Solar Radiation in Zone (kWh/m ² -day)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
15	Number of Day per Month (day)	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	
16	Number of hours per month (hrs)	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	
17													
18	Constraint inputs												
19	Maximum Zonal Temperature	26,6	25,8	26,6	26,4	26	27	27,2	28	27	27	27	
20	Minimum Zonal Temperature	15	15,2	15	14,6	15,6	16,4	9	10	10,2	11,2	12,8	
21													
22	Outputs (Variable)												
23	Solar PV System Conversion Efficiency (m)	0,116	0,117	0,117	0,116	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,116	0,116	0,1
24	Monthly Average Power Solar PV Modul (kW)	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,089	0,090	0,1
25	Solar PV Capacity Factor (%)	0,18912	0,14680	0,19011	0,24560	0,29651	0,21719	0,23835	0,14198	0,25848	0,24877	0,16781	0,1
26													
27	Output (Result)												
28	Energy Generated (kWh)	14,07	9,86	14,14	17,76	19,08	15,84	17,36	10,56	18,61	18,51	12,08	10,64
29	Total Energy Generated (kWh)	178,54											

Daerah	Suhu Rata-rata (°C)	Lama Penyinaran Matahari (Jam)	Radiasi Matahari (kW/m ²)	Energi yang Dibangkitkan (kWh)	Probabilitas Energi yang Dibangkitkan (%)
Pekanbaru	27.24	1269	1	141.59	83
Surabaya	28.54	2077	1	229.73	35
Manggarai	19.90	1557	1	178.54	43
Sorong	27.09	1613.8	1	179.29	31
Barito Selatan	27.13	1421.1	1	157.80	69

Gambar 2. Contoh Perhitungan dengan @RISK di Kabupaten Manggarai

Setelah memasukkan data (*input*) pada gambar 2 dari masing-masing karakteristik dan menghitung energi yang dibangkitkan dengan menggunakan model matematis, maka diperoleh jumlah energi yang dibangkitkan. Kemudian dilakukan pengolahan data secara probabilistik dengan menggunakan @RISK untuk melihat probabilitas energi yang dibangkitkan. Hasil pengolahan data dengan menggunakan @RISK dapat dilihat seperti pada gambar 3.



Gambar 3. Grafik Probabilitas Energi dengan @RISK di Kabupaten Manggarai

Berdasarkan pengolahan data tersebut di atas, maka diperoleh data energi dan probabilitas di lima daerah dengan iklim yang berbeda seperti pada Tabel 6.

Tabel 6. Data Energi dan Probabilitas Energi Lima Daerah dalam Satu Tahun

Berdasarkan pengolahan data dengan menggunakan @RISK, maka diperoleh persentase probabilitas energi yang dibangkitkan seperti terlihat pada tabel 6. Terlihat bahwa besar probabilitas energi berbeda untuk tiap daerah. Probabilitas menjadi acuan untuk melihat kemungkinan energi dapat ditingkatkan. Untuk meningkatkan perolehan energi yang dibangkitkan dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain capacity factor dan luas modul solar pv.

1. Capacity Factor

Berdasarkan pengolahan data secara probabilistik, maka didapatkan data energi rata-rata, energi minimum dan energi maksimum beserta capacity factor di lima daerah dengan menggunakan solar pv dan faktor-faktor iklim (suhu rata-rata, lama penyinaran matahari dan radiasi matahari) yang sama. Berikut contoh perhitungan capacity factor pada Kota Pekanbaru:

$$E_{k,i}^{PV} = 8760 Cap_{k,i}^{PV} CF_i^{PV}$$

$$141.59 = 8760 \times 0.1 \times CF$$

$$141.59 = 876 CF$$

$$CF = \frac{141.59}{876}$$

$$CF = 0.1616 \text{ atau } 16.16\%$$

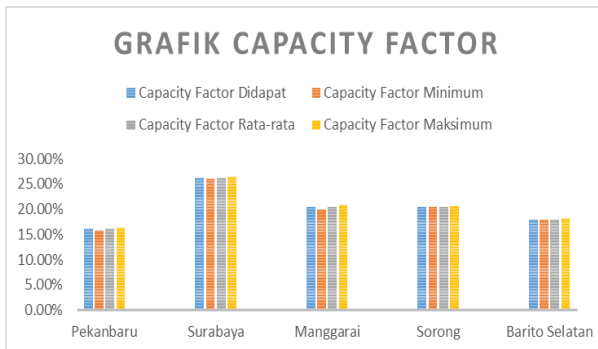
Berdasarkan perhitungan di atas, maka dapat dihitung besarnya capacity factor sesuai dengan energi yang diperoleh, energi minimum, energi rata-rata dan energi



maksimum. Besarnya *capacity factor* masing-masing dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Data Capacity Factor pada Energi Didapat, Minimum, Rata-rata, Maksimum pada Lima daerah

Daerah	Capacity Factor (%)			
	Didapat	Minimum	Rata-rata	Maksimum
Pekanbaru	141.59 kWh	138.57 kWh	140.90 kWh	143.59 kWh
	16.16	15.82	16.08	16.39
Surabaya	229.73 kWh	228.82 kWh	229.83 kWh	230.80 kWh
	26.22	26.12	26.24	26.35
Manggarai	178.54 kWh	175.11 kWh	178.71 kWh	182.79 kWh
	20.38	19.99	20.40	20.87
Sorong	179.29 kWh	178.62 kWh	179.39 kWh	180.12 kWh
	20.47	20.39	20.48	20.56
Barito Selatan	157.80 kWh	156.47 kWh	157.63 kWh	158.82 kWh
	18.01	17.86	17.99	18.13



Gambar 6. Grafik Capacity Factor pada Energi Didapat, Minimum, Rata-rata dan Maksimum di Lima Daerah

2. Luas Modul Solar PV

Dengan menggunakan solar pv dan faktor-faktor iklim (suhu rata-rata, lama penyinaran matahari dan radiasi matahari) yang sama, maka hal yang dapat dilakukan adalah dengan memperbesar luas modul solar pv. Berikut contoh perhitungan untuk kota Pekanbaru:

$$E_{k,i}^{PV} = t \times Cap_{k,i}^{PV} \left(\frac{A \times I_i \times \left[1 - 0.0042 \left(\frac{I_i}{18} + T_i - 20 \right) \right]^{0.012 \times 0.9} \times n \times d \times m}{Pr \times n \times m} \right)$$

$$142.05 = 8760 \times 0.0001 \left(\frac{A \times 1 \times \left[1 - 0.0042 \left(\frac{1}{18} + 27 - 20 \right) \right]^{0.012 \times 0.9} \times 1269}{0.077 \times 8760} \right)$$

$$142.05 = 0.876 \left(\frac{A \times 1 \times (0.113) \times 1269}{674.52} \right)$$

$$142.05 = 0.876 \left(\frac{1269}{674.52} \right)$$

$$142.05 = 1.88A$$

$$A = \left(\frac{142.05}{1.88} \right)$$

$$A = 75.55 \text{ m}^2$$

Dengan demikian, agar probabilitas energi yang dibangkitkan dalam satu tahun sesuai dengan energi yang dibangkitkan di Kota Pekanbaru dengan menggunakan solar pv yang sama, maka harus menggunakan modul solar pv dengan luas 75.31 m^2 .

Modul seperti luas dalam perhitungan di atas dapat diperoleh dengan membagi menjadi beberapa buah solar pv. Satu buah solar pv yang digunakan dalam penelitian ini luas modulnya adalah 0.77 m^2 , maka dengan luas modul solar pv seperti yang diharapkan di atas, dapat dipenuhi dengan penambahan beberapa modul. Berikut contoh perhitungan untuk kota Pekanbaru:

$$\text{Jumlah Modul} = \left(\frac{\text{Luas Modul Solar pv yang diharapkan}}{\text{Luas satuan Modul Solar pv}} \right)$$

$$\text{Jumlah Modul} = \left(\frac{75.55}{0.77} \right)$$

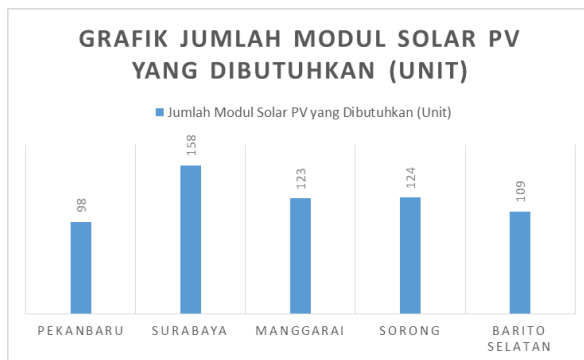
$$\text{Jumlah Modul} = 98.1 \text{ atau } 98 \text{ modul}$$



Berdasarkan perhitungan di atas, maka didapatkan jumlah modul yang dibutuhkan untuk mencukupi kebutuhan energi yang dibangkitkan di lima daerah adalah seperti terlihat pada Tabel 8.

Tabel 8. *Data Luas Modul dan Jumlah Modul Solar PV yang Dibutuhkan untuk Energi yang Dibangkitkan sesuai Probabilitas yang Diharapkan*

Daerah	Energi yang Dibangkitkan (kWh)	Luas Modul Solar PV yang Dibutuhkan (m ²)	Jumlah Modul Solar PV yang Dibutuhkan (Unit)
Pekanbaru	141.59	75.31	98
Surabaya	229.73	122.20	158
Manggarai	178.54	94.97	123
Sorong	179.29	95.37	124
Barito Selatan	157.80	83.94	109



Gambar 7. *Grafik Jumlah Modul Solar PV yang Dibutuhkan untuk Energi yang Dibangkitkan sesuai Probabilitas Harapan*

PEMBAHASAN

Tabel 5 memperlihatkan jumlah energi yang dibangkitkan di lima daerah yang hasilnya berbeda sesuai dengan karakteristik iklim. Tabel 6 memperlihatkan besarnya probabilitas energi yang dibangkitkan yang diperoleh dari pengolahan dengan menggunakan @RISK sesuai dengan karakteristik solar pv. Hasil energi yang dibangkitkan dan besarnya probabilitas energi yang dibangkitkan berbeda-beda di tiap daerah. Kota Surabaya menjadi daerah dengan jumlah energi yang dapat

dibangkitkan terbesar yaitu sebesar 229.73 kWh, sedangkan Kota Pekanbaru menjadi daerah dengan jumlah energi yang dapat dibangkitkan terkecil yaitu sebesar 141.59 kWh. Besarnya energi yang dibangkitkan di Kota Surabaya adalah sekitar 61% dari energi yang dibangkitkan di Kota Pekanbaru. Untuk probabilitas energi yang dibangkitkan, Kota Pekanbaru menjadi daerah dengan probabilitas terbesar untuk menghasilkan energi surya dengan persentase 83%, sedangkan Kabupaten Sorong menjadi daerah dengan probabilitas terkecil untuk menghasilkan energi surya dengan persentase probabilitas 31%.

KESIMPULAN

1. Terdapat perbedaan besarnya energi surya yang dibangkitkan oleh solar pv dengan kapasitas yang sama pada iklim yang berbeda di Indonesia. Besarnya energi yang dibangkitkan dan probabilitas energi yang dibangkitkan dalam waktu satu tahun oleh suatu sistem solar pv pada lima daerah dengan iklim yang berbeda adalah: Pekanbaru: 141.59 kWh dengan probabilitas 83% Surabaya: 229.73 kWh dengan probabilitas 35% Manggarai: 178.54 kWh dengan probabilitas 43% Sorong: 179.29 kWh dengan probabilitas 31% Barito Selatan: 157.80 kWh dengan probabilitas 69%
2. Probabilitas energi yang dibangkitkan terbesar adalah pada Kota Pekanbaru (83%) dengan jumlah energi yang dibangkitkan 141.59 kWh. Sedangkan probabilitas energi yang dibangkitkan terkecil ada pada Kabupaten Sorong (31%) dengan jumlah energi yang dibangkitkan 179.29 kWh.
3. Luas keseluruhan modul solar pv dengan efisiensi sistem 12.96% yang dibutuhkan pada lima daerah dengan iklim yang berbeda adalah sebagai berikut:
Pekanbaru: Luas keseluruhan 75.31m² dengan jumlah modul 98 unit
Surabaya: Luas keseluruhan 122.20m² dengan jumlah modul 158 unit



Manggarai: Luas keseluruhan 94.97m² dengan jumlah modul 123 unit
Sorong: Luas keseluruhan 95.37m² dengan jumlah modul 124 unit
Barito Selatan: Luas keseluruhan 83.94m² dengan jumlah modul 109 unit

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT. PLN Persero 2018-2027.
- [2]. Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017.
- [3]. Katrin Schaber, "*Integration of Variable Renewable Energies in the European Power System: a model-based analysis of transmission grid extensions and energy sector coupling*", Disertasi Technischen Universität München 2013, Munchen.
- [4]. Wajid Muneer, dkk "*Large-Scale Solar PV Investment Models, Tools and Analysis: The Ontario Case*" IEEE Journal of Renewable Energy. 2011.
- [5]. Suriadi dan Mahdi Syukri, "*Perencanaan Pembangkit Tenaga Listrik Surya (PLTS) Terpadu Menggunakan Software PVSYS Pada Komplek Perumahan di Banda Aceh*" Laporan Penelitian Universitas Syiah Kuala 2010. [online] Available: <http://www.jurnal.unsyiah.ac.id/JRE/article/view/167>
- [6]. Romi Wiryadinata dkk, "*Studi Pemanfaatan Energi Matahari Di Pulau Panjang Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif*". Laporan Penelitian Universitas Sultan Ageng Tirtayasa 2013. [online] Available: <http://download.portalgaruda.org/article.php?article=325438&val=7596&title=Studi%20Pemanfaatan%20Energi%20Matahari%20di%20Pulau%20Panjang%20Sebagai%20Pembangkit%20Listrik%20Alternatif>
- [7]. Suharsaputra, Uhar. 2012. Metode Penelitian: Kuantitatif, Kualitatif, dan Tindakan. Bandung: Refika Aditama

