

Simulasi Sistem PLTS Atap dan Harga Satuan Energi Listrik untuk Skala Rumah Tangga di Surabaya

Elieser Tarigan

Jurusan teknik Elektro, dan Pusat Studi Lingkungan dan Energi Terbarukan, Universitas Surabaya
Jl. Raya Kalirungkut, Surabaya 60293
e-mail: elieser@staff.ubaya.ac.id

Abstrak—Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber listrik melalui teknologi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil. Makalah ini memberikan gambaran tentang penggunaan PLTS atap atau *rooftop photovoltaic* (PV) sistem sesuai regulasi yang berlaku di Indonesia. Simulasi komputer dilakukan untuk mengetahui potensi daya dan energi keluaran sistem PLTS atap di kota Surabaya. Simulasi dilakukan perangkat lunak SolarGIS Pvplanner. Persamaan matematis diturunkan untuk memperkirakan harga satuan energi listrik sistem PLTS atap, dan perhitungan dilakukan secara numerik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rata-rata total energi harian yang dihasilkan dari sistem 3 kWp PLTS atap di Surabaya adalah 13 kWh. Sementara, harga satuan listrik PLTS atap didapatkan antara 0,08 USD – 0,11 USD/kWh.

Kata kunci: *PLTS atap, energi listrik, energi surya, simulasi*

Abstract—Solar energy is a renewable energy source that can be used as a source of electricity using photovoltaic (PV) system to reduce our dependence on fossil energy. This paper discusses an overview of the use of a rooftop PV system in accordance with applicable regulations in Indonesia. Computer simulation was conducted to determine the potential power and output energy of the the rooftop PV system in the city of Surabaya. The simulation was carried out by SolarGIS Pvplanner software. Mathematical equations are derived to estimate the unit price of electric energy for the PV system, and the calculations are done numerically. The simulation results show that the total daily energy average generated from the 3 kWp roof solar PV system in Surabaya is about 13 kWh. Meanwhile, the unit price for PV system electricity is obtained between 0.08 USD - 0.11 USD / kWh.

Keywords: *rooftop PV, electricity, solar energy, simulation*

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan energi semakin meningkat seiring dengan peningkatan aktivitas perekonomian dan perindustrian. Hingga saat ini sumber energi utama dunia, termasuk Indonesia adalah sumber energi yang fosil yang terdiri dari minyak bumi, gas alam dan batu bara [1], [2]. Permasalahan serius yang kemudian timbul akibat pemakaian energi fosil adalah: (i) cadangan yang terbatas, dimana jika tingkat konsumsi berlangsung terus seperti sekarang maka diperkirakan cadangan energi fosil akan habis dalam kurun waktu beberapa dekade mendatang; (ii) konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer bumi akan semakin meningkat sehingga menimbulkan berbagai dampak, khususnya pemanasan global dan perubahan iklim yang berakibat pada berbagai sisi kehidupan [1]-[4]. Terkait dengan hal ini maka solusi terhadap keberlangsungan energi (*sustainability*) harus diusahakan secara berkelanjutan. Salah satu solusi yang dapat ditempuh adalah dengan memanfaatkan sumber

energi terbarukan yang tersedia secara alami dan ramah lingkungan. Dalam dokumen Rencana Energi Nasional (RUEN) pemerintah Indonesia menargetkan penggunaan energi terbarukan (bauran energi) sebesar 23% pada tahun 2025 [5]. Energi matahari atau surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang tersedia melimpah setiap hari sepanjang tahun.

Salah satu bentuk energi yang dibutuhkan masyarakat dalam berbagai aktivitas adalah listrik. Secara umum pengguna energi listrik di Indonesia mendapatkan suplai dari jaringan Perusahaan Listrik Negara (PLN), sementara PLN sendiri mendistribusikan energi listrik melalui jaringan yang berasal dari pembangkit listrik yang menggunakan berbagai jenis sumber energi, salah satunya adalah batu bara (energi fosil) melalui pembangkit listrik tenaga uap. Dilain pihak, sebagaimana disebutkan di atas bahwa energi surya yang tersedia dalam bentuk radiasi dapat dimanfaatkan secara langsung sebagai sumber energi listrik tersedia dialam secara melimpah, dan secara teknologi dapat dikonversi menjadi energi listrik secara

langsung dengan perangkat yang dinamakan *photovoltaic* (PV) atau sel surya [6]-[8].

Sistem pembangkit energi dengan teknologi *photovoltaic* dinamakan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Sistem PLTS menggunakan panel surya yang mengkonversi cahaya menjadi listrik. Sistem ini sudah banyak dimanfaatkan diberbagai negara, baik skala kecil maupun untuk pembangkit listrik dalam skala besar [9]-[11]. Sistem PLTS membutuhkan ruang terbuka yang terekspos ke radiasi matahari serta terbebas dari objek atau bayangan yang dapat menghalangi radiasi matahari mengenai panel surya. Ketersediaan area pemasangan panel surya, khususnya di daerah perkotaan, merupakan salah satu kendala dalam pemanfaatan PLTS. Penggunaan lahan kosong khusus untuk sistem PLTS akan menjadi tidak ekonomis dan tidak efektif, apalagi harga tanah atau lahan diperkotaan pada umumnya sangat tinggi [12].

Salah satu solusi agar PLTS dapat dimanfaatkan secara ekonomis di daerah perkotaan adalah dengan menggunakan atap bangunan sebagai area pemasangan panel surya. Pemerintah Indonesia, melalui Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral sedang menggalakkan pemanfaatan dan mengeluarkan regulasi tentang penggunaan atap bangunan untuk pembangkit listrik tenaga surya yang disebut dengan sistem PLTS atap, atau *rooftop PV system* [13].

Karakteristik penyinaran matahari berbeda untuk setiap lokasi dipermukaan bumi. Karakteristik tersebut mencakup potensi sinar matahari, pola cuaca, tipe radiasi yang dominan, temperatur lingkungan dan lain-lain sebagainya. Sementara energi keluaran dari sistem PLTS dipengaruhi oleh karakteristik penyinaran matahari. Artinya, sistem PLTS yang sama jika dipasang di dua lokasi yang berbeda belum tentu menghasilkan jumlah energi yang sama. Sehingga, implementasi PLTS disuatu tempat semestinya dimulai dari perencanaan yang meliputi analisa potensi penyinaran surya di lokasi terkait.

Perhitungan dan analisa melalui simulasi komputer dapat dilakukan untuk mengestimasi kinerja sistem PLTS di suatu lokasi sebelum pemasangan. Simulasi juga berguna untuk meminimalkan biaya pemasangan PLTS [14], [15]. Dari studi literatur didapatkan beberapa penelitian yang melaporkan hasil simulasi PLTS atap. Studi tentang potensi sistem PLTS pada atap gedung yang berlokasi di Ontario dilaporkan oleh Wiginton dkk [16]. Tahapan studi dilakukan dengan simulasi komputer. Langkah-langkah estimasi potensi PLTS pada atap bangunan meliputi pembagian wilayah secara geografis, pengambilan data sampel, memperkirakan kaitan antara luasan atap dan jumlah populasi, mengurangi efek penghalang, serta menghitung total energi yang dihasilkan. Bergamasco dan Asinari [17] melaporkan hasil studi potensi PLTS atap beserta aplikasinya di daerah Barat Laut Italia. Analisis dilakukan dengan simulasi data GIS yang tersedia

Pada regulasi yang dikeluarkan oleh pemerintah Indonesia terkait PLTS atap [13], salah satu sektor pengguna energi menjadi harapan untuk menggunakan sistem PLTS atap adalah sektor rumah tangga. Rumah

tangga yang dimaksud adalah rumah yang telah teraliri listrik PLN, khususnya yang ada diperkotaan. Dengan demikian jaringan listrik dari sistem PLTS atap akan menyatu dengan jaringan PLN yang terpasang dirumah. Jaringan semacam ini dinamakan PLTS atap *grid-connected* atau *on-grid*. Dalam rangka memanfaatkan sistem PLTS atap sesuai regulasi, sebelum implementasi secara riil maka pengguna perlu mengetahui besaran energi yang akan diperoleh dari sistem yang akan dibangun. Dari sisi ekonomi, sangat diperlukan juga perkiraan informasi harga listrik yang harus dibayar oleh pengguna dengan mempertimbangkan berbagai faktor. Informasi harga satuan listrik PLTS atap ini menjadi pertimbangan penting bagi calon pengguna PLTS.

Tujuan penelitian pada artikel ini adalah untuk memberikan gambaran penggunaan PLTS atap sesuai regulasi yang berlaku; mengetahui potensi daya dan energi keluaran sistem PLTS atap; serta untuk memperkirakan harga satuan energi listrik sistem PLTS atap, dengan mengambil rumah tangga yang berlokasi di kota Surabaya sebagai objek studi. Simulasi dilakukan perangkat lunak SolarGIS Pvplanner. Harga satuan energi listrik dihitung secara numerik dengan terlebih dahulu menurunkan persamaan matematis.

Diharapkan informasi yang dipaparkan dalam artikel ini bermanfaat bagi pegiat energi surya khususnya di Indonesia, sekaligus mendukung program pemerintah dalam mengusahakan pemanfaatan energi terbarukan dalam pembangunan nasional secara berkelanjutan.

II. METODE

A. Simulasi PLTS Atap

Simulasi sistem PLTS atap dilakukan untuk rumah tangga yang membutuhkan energi listrik sekitar 13 kWh per hari, atau dengan biaya pemakaian sekitar Rp. 600.000 per bulan (dengan asumsi harga listrik Rp. 15.000/kWh). Secara teknis, tipe rumah seperti yang simulasikan tersebut memiliki daya listrik PLN yang terpasang tipe 2.200 VA atau 2,2 kVA.

Penentuan objek penelitian tersebut adalah dengan pertimbangan bahwa secara statistik tipe rumah tangga atau pelanggan di Surabaya paling banyak dengan kapasitas daya listrik 2,2 kVA. Rumah tangga yang disimulasikan dalam studi ini membutuhkan energi listrik untuk keperluan berbagai peratan listrik, antara lain pendingin udara (AC), lampu untuk penerangan, kipas angin, lemari es, *rice cooker*, dan peralatan elektronik lainnya. Deskripsi lebih jelas tentang peralatan listrik, jumlah unit, daya peralatan, lama pemakaian harian, serta besaran kebutuhan energi harian diperlihatkan pada Tabel 1.

Pola pemakaian daya listrik harian dapat dipetakan dari penggunaan peralatan listrik yang digunakan pada rumah rumah. Pola pemakaian daya listrik tersebut semaksimal mungkin akan disesuaikan dengan pola daya keluaran sistem PLTS atap. Dengan demikian akan diperoleh gambaran besaran energi yang di ekspor ke jaringan PLN

Tabel 1. Perkiraan kebutuhan daya dan energi pada peralatan listrik harian rumah tangga

Alat listrik	Kuantitas	Daya Listrik (W)	Lama Pemakaian Harian Rata-rata (Jam)	Energi Harian (kWh)
Lampu Penerangan	12	10	8	0,96
Pendingin Udara (AC)	2	400	8	6,40
Lemari es	1	80	24	1,92
Pompa air	1	300	2	0,60
Rice Cooker	1	300	4	1,20
Televisi	1	100	5	0,50
Mesin Cuci	1	500	1	0,50
Lainya	-	-	-	0,92
Total Kebutuhan Energi Harian				13,00

dan di impor dari jaringan PLN.

Kajian terhadap regulasi berkaitan dengan PLTS atap yang berlaku juga dilakukan khususnya yang berkaitan rumah tangga, yakni Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (Permen ESDM) no.49 tahun 2018 [13].

Simulasi sistem PLTS atap pada studi ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak (*software*) SolarGIS PV Planner. Perangkat simulasi SolarGIS PV Planner tersedia secara online dan dapat digunakan untuk proses asesmen sebuah sistem PLTS. Proses simulasi pada perangkat tersebut dilakukan secara numerik terhadap data cuaca untuk sepuluh tahun terakhir. Data-data tersebut berasal dari rekaman pada stasiun pengukuran cuaca setempat atau yang terdekat dengan area yang menjadi objek simulasi.

Simulasi dilakukan untuk sistem PLTS atap dengan instalasi *grid connected* (terhubung dengan jaringan listrik PLN) untuk memenuhi kebutuhan energi listrik untuk peralatan sebagaimana disebutkan pada Tabel 1. Kapasitas daya panel surya yang disimulasikan adalah 3 *Kilo Watt Peak* (kWp), dimana disesuaikan dengan perkiraan awal berdasarkan kebutuhan listrik dan potensi penyinaran di Surabaya berdasarkan literatur. Diasumsikan bahwa panel surya dipasang pada atap rumah dengan kemiringan serta azimut (sudut hadap panel) sama dengan atap. Dalam hal ini kemiringan panel dan azimut masing-masing 30° dan 0° (panel terpasang tetap menghadap utara). Parameter *input* lainnya untuk simulasi tertera pada Tabel 2.

B. Perhitungan Harga Satuan Energi Listrik

Komponen utama dari sistem PLTS atap adalah panel surya, *inverter*, dan komponen instalasi. Sementara harga satuan listrik dari sistem pembangkit tersebut bergantung pada komponen biaya termasuk pembelian komponen, *life time* (lamanya sistem bisa dipakai), kebijakan insentif yang ada, serta biaya operasional dan perawatan (*operational and maintenance cost*).

Perhitungan harga satuan listrik PLTS atap dilakukan

Tabel 2. Parameter untuk simulasi PLTS

Parameter	Input
Nama lokasi	Surabaya
Koordinat	07° 19' Selatan, 112° 46' Timur
Ketinggian dari permukaan laut	3 m
Kemiringan	30°
Sudut Hadap Panel	0° (Utara)
Kapasitas daya	3 kWp
Tipe sel surya	crystalline silicon (c-Si)
Tipe instalasi	fixed mounting, free standing
Efisiensi Inverter.	97.5%
Rugi daya DC / AC	5.5% / 1.5%
Availability	99.0%

dengan mengikuti metode yang ada pada penelitian sebelumnya [24]. Persamaan matematis untuk harga satuan listrik PLTS atap (C_{pv}) dapat diturunkan dari rumusan berikut:

$$C_{pv} = \frac{\text{Levelized annual cost}}{\text{Produksi listrik per tahun}} \quad (1)$$

Komponen *Levelized annual cost* terdiri dari biaya tahunan pengembalian modal, biaya operasional dan perawatan, pajak, insentif dan lain-lain. Komponen biaya tahunan pemulihan modal (BPM) diperhitungkan sebagai komponen biaya modal C_c dan faktor pemulihan modal dengan persamaan:

$$BPM = C_c \left[\frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \right] \quad (2)$$

Dimana:

C_c = jumlah investasi awal

r = tingkat suku bunga

t = waktu hidup sistem

Dengan asumsi bahwa komponen biaya tahunan untuk operasional dan perawatan adalah n kali modal awal, sementara komponen lainnya (asuransi, pajak, insentif dan lain-lain) adalah m kali modal awal, dengan $n > 1$ dan $m > 0$ maka *levelized annual cost*, C_{ann} dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$C_{ann} = C_c \left[\frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} + n + m \right] \quad (3)$$

Jika diasumsikan faktor kapasitas pemanfaatan (*capacity utility factor*) sistem PLTS atap adalah F , dan daya maksimum sistem PLTS adalah P_{max} , maka total produksi energi listrik pertahun E_p (dengan hitungan satu tahun = 8.760 jam) dapat dihitung dengan persamaan Persamaan 4.

$$E_p = 8,760 \times P_{max} \times F \quad (4)$$

Untuk menghitung harga satuan listrik dalam satuan nominal uang per satuan daya listrik (dalam USD/kWh) maka persamaan *levelized annual cost* pada Persamaan 1 digunakan dengan nilai C_c menjadi biaya total per watt peak, C_{pw} . Dengan demikian persamaan untuk harga satuan listrik, C_{pv} dapat disederhanakan menjadi:

$$C_{pv} = \frac{C_{pw} \left[\frac{r(1+r)^t + n + m}{(1+r)^t - 1} \right]}{8,760 F} \quad (5)$$

Persamaan 5 digunakan secara numerik untuk menghitung harga satuan listrik dari sistem PLTS. Perhitungan dilakukan dengan beberapa skenario nilai variable terkait.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Potensi Energi Surya

Salah satu faktor penting dalam pertimbangan penggunaan PLTS atap adalah potensi radiasi matahari dan temperature pada suatu daerah. Simulasi menunjukkan bahwa temperatur udara di Surabaya berada pada kisaran $24.0^{\circ}C - 36.0^{\circ}C$. Besarnya potensi radiasi matahari yang dapat dikonversi oleh sel surya dinyatakan dengan besaran radiasi matahari global (*global horizontal irradiation*). Radiasi global tersebut terdiri dari komponen radiasi langsung (*direct*), radiasi pantulan (*reflected*) dan radiasi hamburan (*diffuse*).

Radiasi global dan temperatur di Surabaya untuk satu tahun ditunjukkan pada Gambar 1. Hasil simulasi menunjukkan bahwa radiasi matahari global di Surabaya rata rata sekitar $5,04 \text{ kWh/hari.m}^2$ dengan kisaran minimum $4,82 \text{ kWh/hari.m}^2$ hingga maksimum $6,81 \text{ kWh/hari.m}^2$. Radiasi minimum terjadi sekitar bulan Desember,

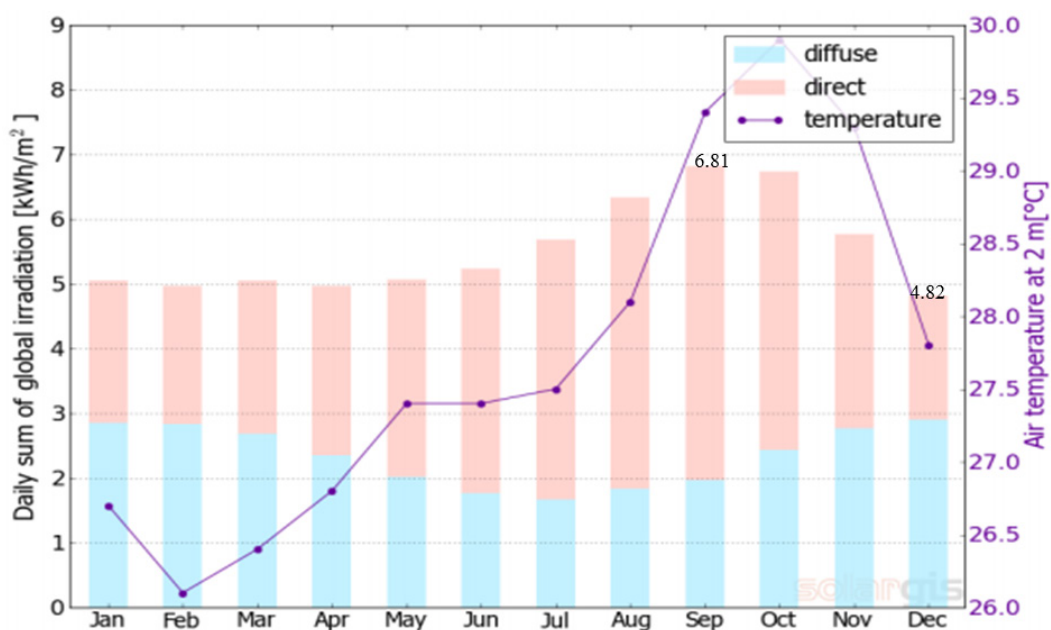
sementara radiasi maksimum terjadi sekitar September.

Dari sisi komponen, diketahui bahwa komponen radiasi hamburan cukup signifikan sepanjang tahun. Dilain pihak komponen radiasi pantulan didapati sangat kecil sepanjang tahun. Secara umum, radiasi global akan maksimum pada saat musim kemarau, dan sebaliknya akan minimum pada saat musim penghujan.

B. Regulasi PLTS Atap di Indonesia

Pemanfaatan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap (*rooftop PV system*) di Indonesia pada saat ini diatur oleh pemerintah yang tertuang dalam Peraturan Menteri ESDM Nomor 49 tahun 2018 tentang Penggunaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap oleh konsumen PT. PLN. Regulasi ini membuka peluang bagi pelanggan PLN baik dari sektor rumah tangga, bisnis, sosial, industri, maupun bangunan pemerintah untuk memasang PLTS pada bangunan dan dihubungkan dengan jaringan PLN yang sudah ada. Hal ini dapat menjadi kontribusi dalam rangka pemanfaatan dan pengelolaan energi terbarukan khususnya energi surya sekaligus pencapaian ketahanan dan kemandirian energi nasional.

Berdasarkan regulasi Permen ESDM No 49 tahun 2018 tersebut, listrik yang dihasilkan dari sebuah PLTS atap dapat dipakai sendiri oleh pelanggan PLN, dan apabila besaran listrik yang diproduksi melebihi kebutuhan pelanggan (surplus), maka kelebihan tersebut akan di ekspor ke jaringan PLN dan tercatat dalam meteran (kWh meter) yang dipasang. Dalam hal ini jenis meteran listrik yang digunakan adalah kWh meter tipe *export-import* (exim). Akan tetapi energi listrik yang di ekspor ke jaringan PLN dihargai dengan faktor pengali 65%. Mekanismenya, surplus energi yang diekspor pada bulan berjalan akan tercatat dan menjadi deposit yang untuk mengurangi tagihan listrik bulan berikutnya. Mengacu pada



Gambar 1. Radiasi matahari global dan temperatur udara di Surabaya

aturan tersebut maka pelanggan sebaiknya mengetahui kapasitas PLTS yang sesuai dengan kebutuhan, sehingga mendapatkan manfaat secara maksimal, terutama dalam hal ekonomis dari kelebihan daya.

Implementasi sistem PLTS atap relatif mudah, dan telah banyak diimplementasikan di berbagai negara [25]–[28]. Kapasitas panel surya dapat diatur dan disesuaikan dengan luasan atap yang tersedia. Pemasangan dilakukan secara sambungan langsung dengan jaringan PLN (*grid-connected*). Panel surya dipasang pada atap bangunan, kemudian listrik yang dihasilkan dalam bentuk arus searah (*direct current*, DC) dikonversi menjadi arus bolak-balik (*alternating current*, AC) menggunakan alat yang dinamakan *inverter*. Dalam regulasi Permen ESDM No 49 tahun 2018 telah diatur ketentuan umum, termasuk perhitungan ekspor dan impor energi, pembangunan dan pemasangan, penggunaan sistem, pelaporan, ketentuan peralihan, ketentuan lainnya. Penting untuk diketahui bahwa kapasitas daya maksimum dari panel surya dibatasi maksimum sebesar 100% dari daya tersambung pada bangunan pelanggan saat pengajuan.

C. Hasil Simulasi PLTS Atap

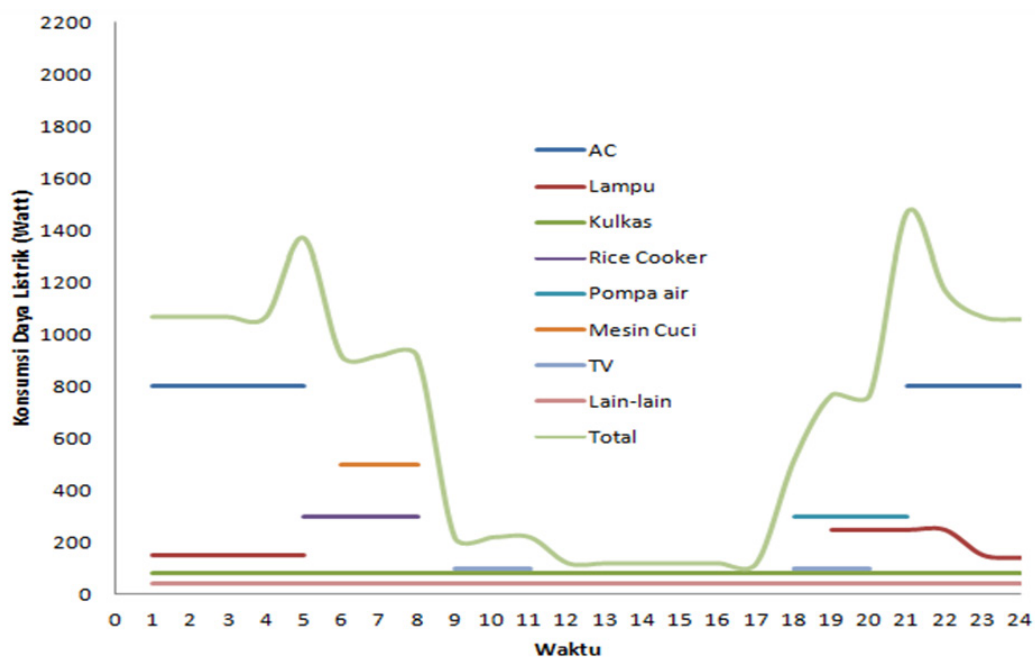
Pola konsumsi daya listrik harian (24 jam berturut-turut) pada rumah yang disimulasikan dapat diperkirakan dari peralatan dan lama penggunaan sebagaimana terdapat dalam Tabel 1. Pola konsumsi daya listrik harian masing-masing alat serta besaran totalnya adalah seperti digambarkan Gambar 2. Terlihat bahwa pemakaian daya listrik relatif tinggi pada kisaran waktu 17.30 sampai dengan 08.00 pagi. Kondisi ini dapat dimengerti dimana secara umum kegiatan di rumah yang menggunakan banyak peralatan listrik terjadi pada waktu tersebut. Dilain pihak, pada rentang waktu jam 9.00 hingga jam

17.00, pemakaian daya listrik daya listrik relatif rendah. Pada periode tersebut daya listrik digunakan hanya untuk keperluan peralatan listrik yang hidup secara kontinyu seperti lemari pendingin, serta alat listrik lainnya. Daya listrik maksimum yang dibutuhkan dalam kondisi normal adalah sekitar 1400 W. Peralatan listrik yang membutuhkan daya listrik paling tinggi adalah pendinginan udara (AC), dimana porsi konsumsi energinya mencapai 48% dari total kebutuhan.

Mengacu pada pola konsumsi daya dan energi harian, potensi radiasi surya di Surabaya, serta regulasi yang berlaku maka kapasitas PLTS atap, khususnya panel surya dan *inverter* yang menjadi komponen utama dapat disimulasikan untuk perkiraan pemenuhan kebutuhan listrik secara optimal. Ketersediaan satuan yang ada di pasar komersil juga menjadi pertimbangan, misalnya alat *inverter* DC-AC, yang tersedia hanya pada besaran tertentu saja. Dari survei singkat yang dilakukan melalui internet, besaran *inverter type grid-connected* sesuai untuk PLTS atap 3 kWp yang tersedia adalah *inverter* dengan kapasitas 3000 Watt.

Sebagaimana telah diketahui sebelumnya bahwa potensi energi surya di Surabaya, rata-rata sekitar 5,04 kWh/hari.m². Pola daya keluaran harian sistem PLTS atap dengan kapasitas 3kWp disimulasikan dari ekstrapolasi konversi radiasi dengan nilai intensitas rata-rata di Surabaya tersebut. Pada kondisi yang sebenarnya pola daya keluaran tersebut dapat bervariasi namun energi keluaran total selama satu hari tidak jauh berbeda. Variasi pola tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti gerakan awan, cuaca, polusi udara, dan sebagainya.

Pada kondisi yang ideal, hasil simulasi terhadap perbandingan antara pola kebutuhan daya listrik rumah tangga dengan daya keluaran harian sistem PLTS atap di Surabaya dengan kapasitas 3 kWp ditampilkan pada



Gambar 2. Pola pemakaian daya listrik harian

Gambar 3. Dapat dilihat bahwa pada rentang waktu sekitar jam 8.00 hingga 17.15 daya listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS atap melebihi kebutuhan rumah. Pada periode ini daya listrik PLTS atap akan di ekspor ke jaringan listrik PLN. Alat kWh meter exim akan mencatat besaran energi yang diekspor

Dilain pihak, untuk rentang waktu jam 17.15 hingga jam 8.00 hari berikutnya, daya keluaran sistem PLTS relatif kecil, bahkan pada malam hari tidak ada sama sekali. Sementara kebutuhan daya listrik cukup signifikan tinggi pada saat itu. Dalam periode ini kebutuhan daya listrik akan disuplai atau diimpor dari jaringan PLN. Sesuai dengan regulasi maka tagihan listrik bulanan dihitung dari selisih dari total impor dan ekspor dalam rentang satu bulan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa total energi harian yang dihasilkan dari sistem PLTS atap adalah 13 kWh, besaran energi ini sesuai dengan kebutuhan kebutuhan listrik rumah yang disimulasikan.

Meskipun pada kenyataan energi dan daya keluaran sistem PLTS dipengaruhi oleh faktor pengoperasian seperti cuaca dan iklim, namun dengan memasukan parameter tersebut pada proses simulasi, maka diharapkan hasil yang diperoleh dari proses simulasi akan mendekati nilai yang sebenarnya.

Metode simulasi sangat bermanfaat untuk membuat estimasi awal energi dan daya keluaran sistem PLTS sebelum membangun sistem secara riil. Estimasi awal yang baik berpengaruh pada nilai investasi, yang mana akan berkaitan dengan harga satuan listrik yang harus ditanggung oleh pengguna.

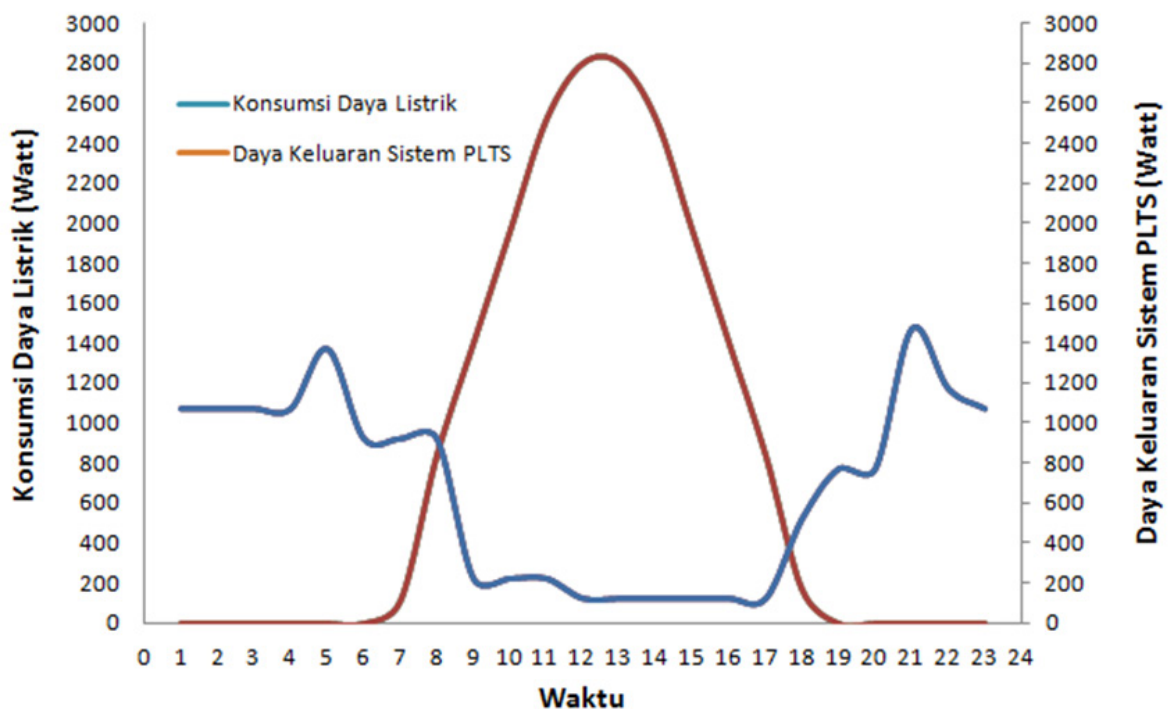
Energi keluaran bulanan dari hasil simulasi terhadap sistem PLTS atap dengan kapasitas 3 kWp, dibandingkan dengan kebutuhan energi listrik rumah adalah seperti yang

ditunjukkan pada Gambar 4. Hasil simulasi menunjukkan bahwa energi keluaran sistem PLTS atap pada periode bulan April sampai September melebihi kebutuhan energi listrik rumah tangga yang disimulasikan. Sebaliknya, untuk bulan Oktober hingga Maret, produksi sistem PLTS atap lebih kecil dari konsumsi listrik. Kondisi ini terjadi karena kemungkinan bulan Oktober sampai Maret merupakan musim penghujan di Jawa Timur, termasuk Surabaya, sehingga energi keluaran sistem PLTS atap lebih kecil dibanding dengan produksi listrik pada musim kemarau.

Hasil simulasi untuk total selama satu tahun menunjukkan bahwa energi keluaran sistem PLTS atap di Surabaya dengan kapasitas sistem panel 3 kWp adalah sekitar 4.200 kWh. Jika dibandingkan dengan kebutuhan energi rumah tinggal dalam setahun sekitar 4.680 kWh maka dapat disimpulkan bahwa kebutuhan tersebut dapat dipenuhi dari sistem PLTS atap sampai dengan 90%. Dalam hal ini sekitar 10% dari total kebutuhan akan disuplai dari jaringan PLN.

D. Harga Satuan Listrik PLTS Atap

Estimasi harga satuan listrik sistem PLTS atap, Cpv, dilakukan dengan perhitungan numerik Persamaan 5. Nilai parameter yang dipakai dalam perhitungan adalah sebagai berikut: waktu hidup (*life time*) dari panel surya $t = 20$ tahun. Hal tersebut merupakan standar yang biasanya ditawarkan oleh pabrikan panel surya, biaya tahunan untuk operasional dan perawatan $n = 5\%$. Biaya ini termasuk biaya pembersihan panel bila diperlukan, khususnya dimusim kemarau dimana debu mempengaruhi kinerja dari panel., faktor kapasitas pemanfaatan (*capacity utility*



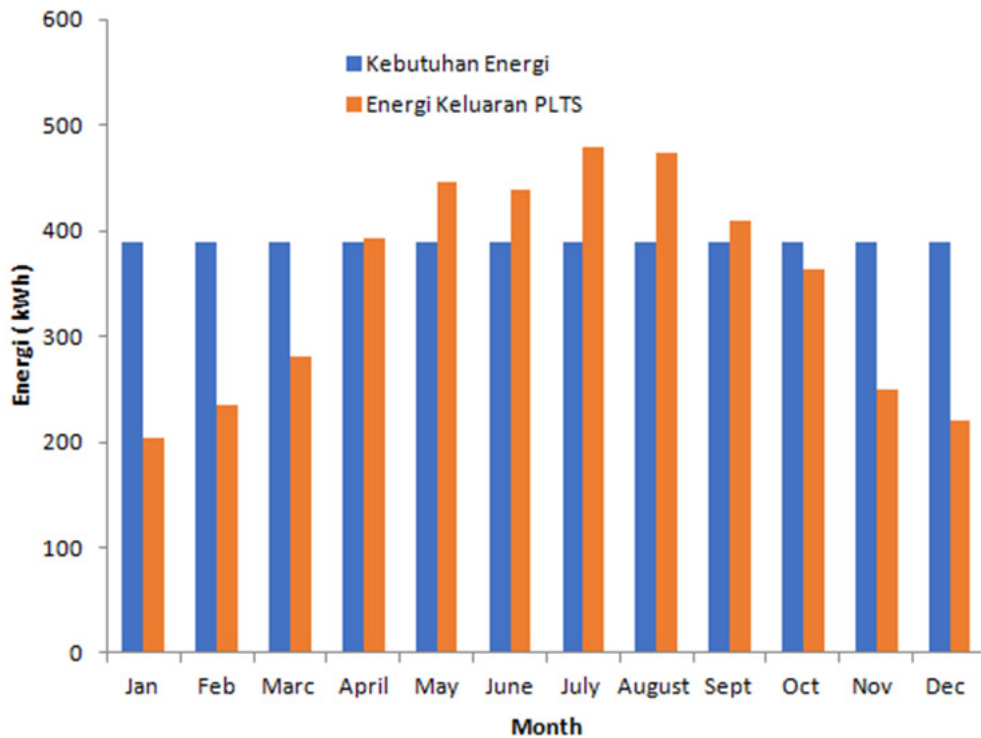
Gambar 3. Perbandingan pola pemakaian daya listrik harian dan daya keluaran sistem PLTS

factor) sistem PLTS atap, $F = 20\%$. Nilai ini disesuaikan dengan potensi energi surya di Surabaya sebagaimana telah dibahas sebelumnya.

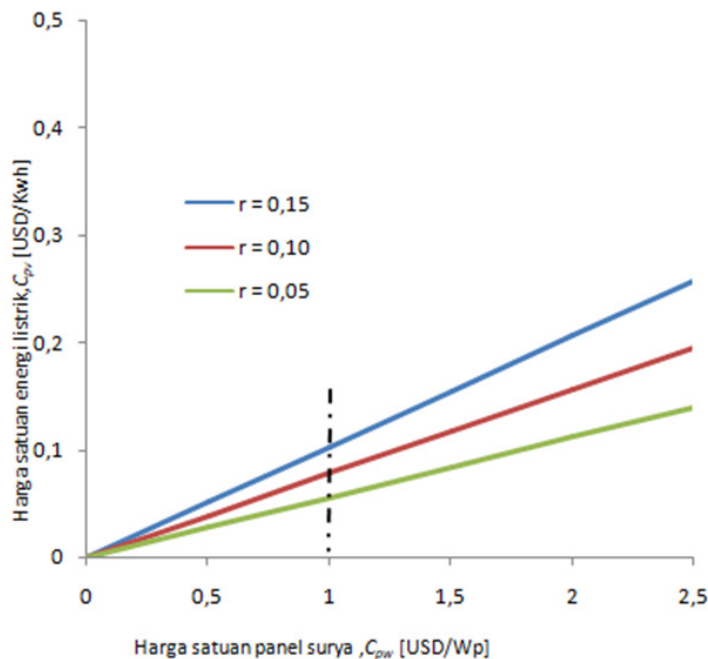
Komponen biaya terkait lainnya (asuransi, pajak, insentif dan lain-lain), $m = 0$. Sesuai dengan regulasi saat ini maka komponen ini dianggap tidak ada.

Simulasi dilakukan dengan tiga variasi nilai suku bunga r yang berbeda, masing-masing 5%; 10%; dan 15%. Hasil simulasi dengan input parameter biaya

tersebut diatas ditampilkan pada Gambar 5. Harga satuan listrik PLTS Cpv bergantung pada harga satuan panel C_{pw} sebagai komponen utama sistem *grid connected*. Survei pasar melalui internet dilakukan untuk mengetahui nilai C_{pw} . Pada saat artikel ini dibuat, harga satuan panel surya adalah sekitar 1.0 USD/Wp. Berdasarkan grafik pada Gambar 5, dapat dikonversikan dan didapatkan bahwa harga satuan listrik PLTS atap adalah antara 0,08 – 0,11 USD/kWh.



Gambar 4. Perbandingan konsumsi listrik bulanan dan energi keluaran sistem PLTS



Gambar 5. Harga satuan energi listrik dengan beberapa skenario nilai r

IV. KESIMPULAN

Potensi energi matahari di Surabaya didapatkan sekitar 5,04 kWh/hari.m². Hasil simulasi menunjukkan bahwa PLTS atap dengan kapasitas 3 kWp di Surabaya dapat menghasilkan energi listrik sekitar 4200 kWh per tahun atau sekitar 13 kWh per hari. Diperkirakan bahwa energi keluaran tersebut dapat mencukupi kebutuhan sebuah rumah tangga dengan tagihan listrik sekitar Rp.600.000 perbulan (dengan harga listrik PLN Rp. 1500/kWh) hingga 90%. Harga satuan energi listrik PLTS didapatkan dalam kisaran 0.08 – 0.011 USD/kWh. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa harga listrik PLTS atap saat ini seimbang dengan harga listrik PLN. Informasi yang dipaparkan dalam tulisan ini diharapkan bermanfaat bagi pegiat energi surya, khususnya di Indonesia, sekaligus mendukung program pemerintah dalam mengusahakan pemanfaatan energi terbarukan dalam pembangunan nasional secara berkelanjutan

REFERENSI

- [1] IESR, "Indonesia Clean Energy Outlook Imprint Indonesia Clean Energy Outlook 2020," *IESR*, pp. 1–54, 2018, [Online]. Available: www.iesr.or.id.
- [2] S. Kumar, "Assessment of renewables for energy security and carbon mitigation in Southeast Asia: The case of Indonesia and Thailand," *Appl. Energy*, vol. 163, pp. 63–70, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.11.019.
- [3] R. Dutu, "Challenges and policies in Indonesia's energy sector," *Energy Policy*, vol. 98, pp. 513–519, 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2016.09.009.
- [4] Deendarlianto *et al.*, "Scenarios analysis of energy mix for road transportation sector in Indonesia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, pp. 13–23, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.206.
- [5] K. ESDM, "Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)," 2016. <https://www.esdm.go.id/id/publikasi/ruen>.
- [6] A. Hidayatno, A. D. Setiawan, I. M. Wikananda Supartha, A. O. Moeis, I. Rahman, and E. Widiono, "Investigating policies on improving household rooftop photovoltaics adoption in Indonesia," *Renew. Energy*, vol. 156, pp. 731–742, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.106.
- [7] A. Sola, C. Corchero, J. Salom, and M. Sanmarti, "Simulation tools to build urban-scale energy models: A review," *Energies*, vol. 11, no. 12, MDPI AG, Dec. 01, 2018, doi: 10.3390/en1123269.
- [8] D. Setyawati, "Analysis of perceptions towards the rooftop photovoltaic solar system policy in Indonesia," *Energy Policy*, vol. 144, no. May, 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111569.
- [9] A. Chaianong, A. Bangviwat, C. Menke, and N. R. Darghouth, "Cost-benefit analysis of rooftop PV systems on utilities and ratepayers in Thailand," *Energies*, vol. 12, no. 11, 2019, doi: 10.3390/en12122265.
- [10] S. Sreenath, K. Sudhakar, A. F. Yusop, E. Solomin, and I. M. Kirpichnikova, "Solar PV energy system in Malaysian airport: Glare analysis, general design and performance assessment," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 698–712, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.03.015.
- [11] J. Houry, R. Mbayed, G. Salloum, E. Monmasson, and J. Guerrero, "Review on the integration of photovoltaic renewable energy in developing countries - Special attention to the Lebanese case," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 562–575, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.062.
- [12] E. Tarigan, "Rooftop PV system policy and implementation study for a household in Indonesia," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 10, no. 5, pp. 110–115, 2020, doi: 10.32479/ijeep.9539.
- [13] Government of Indonesia, *Peraturan Menteri ESDM No. 49 Tahun 2018 tentang Penggunaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap*. 2018.
- [14] A. Benatallah, R. Mostefaoui, M. Boubekri, and N. Boubekri, "A simulation model for sizing PV installations," *Desalination*, vol. 209, no. 1, pp. 97–101, 2007, doi: 10.1016/j.desal.2007.04.015.
- [15] A. K. Shukla, K. Sudhakar, and P. Baredar, "Simulation and performance analysis of 110 kWp grid-connected photovoltaic system for residential building in India: A comparative analysis of various PV technology," *Energy Reports*, vol. 2, pp. 82–88, 2016, doi: 10.1016/j.egyr.2016.04.001.
- [16] L. K. Wiginton, H. T. Nguyen, and J. M. Pearce, "Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy," *Comput. Environ. Urban Syst.*, vol. 34, no. 4, pp. 345–357, 2010, doi: 10.1016/j.compenurbysys.2010.01.001.
- [17] L. Bergamasco and P. Asinari, "Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Application to Piedmont Region (Italy)," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 1041–1055, 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.02.022.
- [18] SolarGis, "SolarGis PVPlanner," 2021. <http://solargis.info/pvplanner> (accessed Mar. 01, 2017).
- [19] BPS Kota Surabaya, "Surabaya Dalam Angka," *Surabaya Dalam Angka*, 2016. <https://surabayakota.bps.go.id> (accessed Mar. 30, 2017).
- [20] E. Tarigan, Djuwari, and L. Purba, "Assessment of PV power generation for household in surabaya using solarGIS-pvplanner simulation," *Energy Procedia*, vol. 47, no. December, pp. 85–93, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.01.200.
- [21] worldweatheronline.com, "Surabaya Monthly Climate Averages." <https://www.worldweatheronline.com/surabaya-weather-averages/east-java/id.aspx> (accessed May 15, 2019).
- [22] E. Tarigan, Djuwari, and F. D. Kartikasari, "Techno-economic Simulation of a Grid-connected PV System Design as Specifically Applied to Residential in Surabaya, Indonesia," in *Energy Procedia*, 2015, vol. 65, pp. 90–99.
- [23] E. Tarigan, "Simulation and feasibility studies of rooftop PV system for university campus buildings in Surabaya, Indonesia," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 8, no. 2, pp. 895–908, 2018.
- [24] E. Tarigan, Djuwari, and F. D. Kartikasari, "Techno-economic Simulation of a Grid-connected PV System Design as Specifically Applied to Residential in Surabaya, Indonesia," *Energy Procedia*, vol. 65, pp. 90–99, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.01.038.
- [25] J. Ordonez, E. Jadraque, J. Alegre, and G. Martinez, "Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain)," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 7, pp. 2122–2130, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.01.001.
- [26] L. Ko, J. C. Wang, C. Y. Chen, and H. Y. Tsai, "Evaluation of the development potential of rooftop solar photovoltaic in Taiwan," *Renew. Energy*, vol. 76, pp. 582–595, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.11.077.
- [27] Z. Zulkifli, W. Wilopo, and M. K. Ridwan, "An Analysis of Energy Production of Rooftop on Grid Solar Power Plant on A Government Building (A Case Study of Setjen KESDM Building Jakarta)," *JPSE (Journal Phys. Sci. Eng.)*, vol. 4, no. 2, pp. 55–66, 2020, doi: 10.17977/um024v4i22019p055.
- [28] J. Gajjar, S. Raizada, V. Kumar, N. Abraham, and S. Ghosh, "Economic effect of rooftop photovoltaic penetration on retail rates of bangalore electricity supply company," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 9, no. 1, pp. 336–345, 2019, doi: 10.32479/ijeep.6036.