

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian ini dilakukan untuk memperoleh pengembangan sistem energi radiasi matahari sebagai energi listrik yang berwawasan lingkungan dengan wilayah studi Provinsi Jawa Tengah. Studi literatur yang ada terkait dengan perspektif hierarkis yang sering digunakan dalam praktik estimasi potensi energi surya, pemodelan radiasi matahari, estimasi potensi fotovoltaik surya atap dan potensi apa yang diperkirakan dampak dari energi surya fotovoltaik tersebut terhadap total emisi karbon di suatu wilayah.

A. Model Radiasi Matahari

Kitab suci Al-Qur'an, dalam surah Asy-syams ayat pertama menyebutkan bahwa "Demi matahari dan sinarnya pada pagi hari" dan surah Al-Lail ayat pertama menyebutkan bahwa "Demi malam apabila menutupi (cahaya siang)". Dalam kedua surah tersebut mempertunjukkan kata kunci sinar atau cahaya dari matahari yang mengandung sumber energi. Menurut para ahli (astronomi-fisika), suhu permukaan matahari 6000°K (5727°C) dengan jarak rata-rata matahari sampai bumi 150 juta km. Rata-rata 30% radiasi yang sampai dipermukaan bumi dipantulkan kembali ke angkasa luar. Matahari adalah sumber energi utama bagi kehidupan dipermukaan bumi. Radiasi yang sampai di puncak atmosfer 1360 Wm^{-2} , tetapi yang sampai ke permukaan bumi setengah dari yang diterima di puncak atmosfer.

Radiasi adalah pemindahan energi/kalor dari permukaan matahari ke suatu tempat di permukaan bumi yang dipancarkan dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Energi pancaran menuju permukaan mengalami proses: (1) Penyerapan; (2) Pemancaran; (3) Penyerapan dan pembauran. Keseimbangan yang terjadi akibat berbagai proses yang terjadi di dekat permukaan

bumi. Radiasi matahari dapat dinyatakan dalam berbagai komponen dan tiap komponen memiliki efek yang berbeda terhadap suatu permukaan. Komponen-komponen tersebut meliputi: (1) Intensitas radiasi merupakan jumlah energi yang dipancarkan oleh matahari per satuan waktu per satuan luas; (2) Kualitas radiasi yaitu panjang gelombang sinar atau tingkat energi yang dipancarkan oleh matahari; (3) Panjang hari yang menyatakan periode mulai terbit sampai terbenamnya surya dan merupakan lama penyinaran maksimum yang dapat dicapai surya; (4) Lama penyinaran yang menyatakan lama surya bersinar cerah bila intensitas yang dipancarkan paling rendah $0.3 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

Penyinaran matahari (*solar irradiance*) adalah daya per satuan luas yang diterima dari Matahari dalam bentuk radiasi elektromagnetik dalam rentang panjang gelombang dari alat ukur. Radiasi matahari yang terintegrasi dari waktu ke waktu disebut iradiasi surya, insolasi, atau paparan matahari. Namun, insolasi sering digunakan secara bergantian dengan iradiansi. Iradiansi dapat diukur di ruang angkasa atau di permukaan bumi setelah penyerapan dan hamburan atmosfer. Iradiansi dalam ruang adalah fungsi jarak dari Matahari, siklus matahari, dan perubahan lintas-siklus. Iradiansi pada permukaan Bumi juga tergantung pada kemiringan permukaan ukur, ketinggian matahari di atas cakrawala, dan kondisi atmosfer.

Angka iradiasi surya digunakan untuk merencanakan penyebaran sistem tenaga surya. Di banyak negara, angka-angka tersebut dapat diperoleh dari peta insolasi atau dari tabel insolasi yang mencerminkan data selama 30-50 tahun sebelumnya. Studi dan pengukuran radiasi matahari memiliki beberapa aplikasi penting, termasuk prediksi pembangkit energi dari pembangkit listrik tenaga surya, pemanasan dan pendinginan bangunan, dan dalam pemodelan iklim dan peramalan cuaca. Teknologi tenaga surya yang berbeda dapat menggunakan komponen iradiasi total yang berbeda. Sementara panel surya fotovoltaik mampu

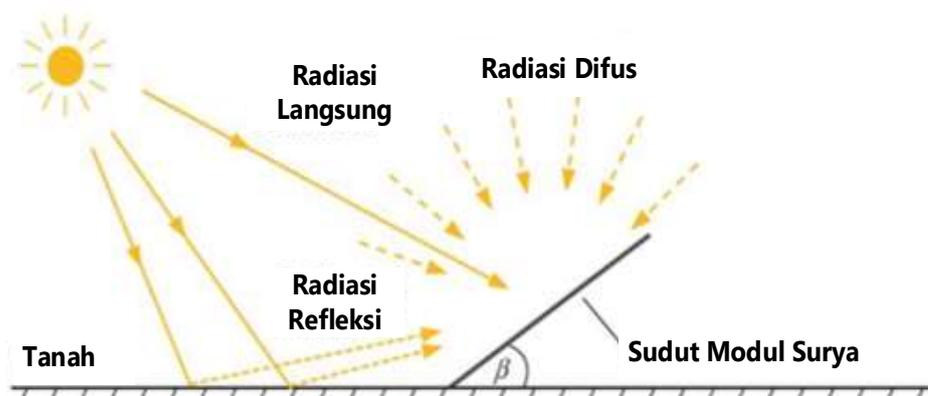
mengkonversi ke listrik baik iradiasi langsung dan iradiasi difus, tenaga matahari terkonsentrasi hanya mampu beroperasi secara efisien dengan iradiasi langsung, sehingga membuat sistem ini hanya cocok di lokasi dengan tutupan awan yang relatif rendah.

Secara teoretis, energi matahari memiliki potensi untuk secara memadai memenuhi permintaan energi seluruh dunia jika teknologi untuk memanen dan memasoknya sudah tersedia. Hampir empat juta exajoule ($1 \text{ EJ} = 10^{18} \text{ J}$) energi matahari mencapai bumi setiap tahun $5 \times 10^4 \text{ EJ}$ yang diklaim mudah dipanen (Kabir *dkk.*, 2018). Radiasi matahari dapat diukur atau diperkirakan dari model yang sesuai (Angela *dkk.*, 2011). Beberapa teknik prediksi yang digunakan dalam memperkirakan radiasi matahari termasuk stokastik (Zeroual *dkk.*, 1995), analitik (Dagestad, 2005), metode empiris (Angstrom, 1924) dan jaringan saraf tiruan (Mohandes *dkk.*, 1998).

Penggunaan jaringan saraf tiruan untuk memprediksi radiasi matahari telah dilakukan antara lain di Amerika, Eropa, Afrika, Asia dan beberapa negara lain. Model jaringan saraf tiruan yang dikembangkan hingga saat ini untuk memperkirakan radiasi matahari didasarkan pada beberapa parameter input geografis dan meteorologi: lintang, bujur, ketinggian, durasi sinar matahari, kelembaban relatif, tutupan awan, dan suhu maksimum (Mubiru dan Banda, 2008). Parameter durasi sinar matahari yang paling banyak dan umum digunakan dalam model radiasi matahari mempengaruhi besarnya insiden iradiasi matahari global di lokasi tertentu. sinar matahari (Udo, 2002).

Radiasi merupakan suatu proses merambatnya energi panas dari matahari dalam bentuk gelombang elektromagnetik tanpa menggunakan zat perantara. Kondisi hampa udara antara matahari dan bumi menyebabkan radiasi matahari dapat sampai ke permukaan bumi. Radiasi elektromagnetik atau yang biasa disebut dengan radiasi matahari bewujud partikel yang biasa

disebut dengan foton (Klever 2018). Faktor terpenting yang mempengaruhi pembangkit listrik fotovoltaik adalah jumlah radiasi matahari yang masuk. Radiasi matahari, atau insolasi, adalah energi matahari yang mencapai permukaan bumi. Ini terdiri dari tiga komponen: radiasi langsung, radiasi difus, dan radiasi pantulan tanah (Klever 2018; Chowdhury 2016; Perez dkk. 1987). Pada gambar 2.1 memperlihatkan cara ketiga radiasi mencapai permukaan bumi.



Gambar 2.1 Radiasi matahari

[Sumber: (Chowdhury 2016)]

Radiasi langsung adalah sinar langsung dari energi matahari yang dicegat oleh permukaan tanpa interaksi dengan partikel di atmosfer (Hetrick dkk. 1993). Radiasi difus adalah radiasi yang dicegat yang tersebar di atmosfer oleh gas dan aerosol (Hetrick dkk. 1993; Kumar dkk. 1997). Radiasi yang dipantulkan tercermin dari permukaan medan dan sekitarnya (Kumar dkk. 1997; Esri 2013). Bersama-sama, radiasi langsung, difus dan pantulan membentuk radiasi global, atau radiasi total, mencapai permukaan bumi.

Jumlah radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi tergantung pada lokasi, efek atmosfer, dan topografi. Radiasi matahari dipengaruhi oleh rotasi dan revolusi geometris bumi di sekitar matahari (Fu dkk. 1999). Ini juga bervariasi dengan faktor lingkungan seperti efek pelemahan atmosfer termasuk tutupan awan dan uap air (Fu dkk. 1999). Di tanah, efek topografi

seperti ketinggian, kemiringan, dan orientasi memengaruhi jumlah radiasi yang mencapai permukaan (Suri dkk. 2004).

Memahami jumlah radiasi matahari yang mencapai permukaan adalah penting untuk lebih dari sekedar mengevaluasi potensi energi terbarukan. Hampir semua aktivitas manusia bergantung pada kekuatan matahari (Fu dkk. 1999). Sayangnya, untuk sebagian besar wilayah geografis, data insolasi terukur tidak lengkap atau hanya tersedia pada skala yang sangat kasar (Fu dkk. 1999). Sehingga minimnya pemanfaatan radiasi matahari untuk menjadi energi bersih yang dapat dikonversi dari sistem thermal ataupun sistem fotovoltaik.

Jumlah radiasi matahari yang sampai dipermukaan modul surya (I_{panel}) pada sistem fotovoltaik dapat dihitung dengan Persamaan 2.1. Dimana I_{dir} adalah iradiasi langsung, I_{dif} adalah iradiasi difus dan I_{ref} panel adalah iradiasi refleksi pada panel surya. Seluruh iradiasi tersebut dipresentasikan dalam satuan (W/m^2). Setelah dikalikan dan luas area, radiasi akan menjadi iradiasi matahari dan satuan I_{panel} akan menjadi watt (Klever 2018; Chowdhury 2016; Perez dkk. 1987).

$$I_{\text{panel}} = I_{\text{dir}} + I_{\text{dif}} + I_{\text{ref panel}} \quad (2.1)$$

Energi matahari jatuh di permukaan bumi dengan kecepatan 120 petawatt. Matahari memberikan tenaga atau daya sebesar $1,4 \times 10^5$ TW yang diterima di permukaan bumi dan sekitar $3,6 \times 10^4$ TW dari daya ini dapat digunakan. Besarnya energi yang diterima dari matahari ke Bumi dalam satu hari dapat memenuhi permintaan energi listrik seluruh dunia selama lebih dari 20 tahun. Nilai tersebut juga setara 10.000 kali cadangan ketersediaan energi yang ada di bumi serta permintaan energi primer secara global dalam satu tahun (BPSR 2018).

Radiasi matahari banyak digunakan untuk menentukan tingkat puncak energi listrik dari sistem fotovoltaik yang mampu dihasilkan. Dalam perencanaan sistem fotovoltaik lebih lanjut,

nilai radiasi matahari dapat digunakan untuk mengetahui berapa banyak energi surya yang telah terkumpul oleh fotovoltaik selama kurun waktu tertentu seperti hari, minggu, atau tahun (Brownson 2014). Radiasi cahaya matahari sampai ke permukaan bumi sangat bervariasi karena dipengaruhi oleh efek atmosfer, garis lintang dan musim di lokasi pemasangan (Klever 2018). Radiasi matahari diukur di permukaan tanah dengan instrumen yang dikenal sebagai pyranometer. Ketika dipasang secara horizontal, instrumen mengukur global horizontal irradiance (GHI). Irradiansi ini adalah jumlah geometris dari dua komponen yaitu radiasi normal langsung (DNI), yang merupakan radiasi langsung dari matahari; dan penyebaran horizontal difus (DHI), yang merupakan radiasi total yang dipantulkan dari awan dan molekul serta partikel lain di atmosfer:

$$GHI = DHI + [DNI \times \cos(z)] \quad (2.2)$$

Dimana, DHI adalah *diffuse horizontal irradiance*, DNI adalah *direct normal irradiance*, dan z adalah *solar zenith angle* (Stoffel dkk. 2010).

Indonesia yang berada di garis khatulistiwa menjadikan Indonesia memiliki potensi energi matahari dari radiasi matahari yang cukup tinggi, karena matahari terus bersinar sepanjang tahun dengan rata-rata waktu sinar enam jam hingga delapan jam dalam satu hari. Sedangkan rata-rata penyinaran ideal yang dapat digunakan dalam produksi listrik berbasis sistem fotovoltaik adalah empat hingga lima jam (Sukmajati dkk. 2015). Berdasarkan Jurnal Energi Edisi 02 yang diterbitkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, disebutkan bahwa Indonesia memiliki potensi energi baru terbarukan yang sangat besar. Khususnya potensi pada energi surya sebesar 4,80 kWh/m²/hari atau setara dengan 112.000 GWp (Kementerian ESDM 2018).

Masing-masing wilayah di Indonesia memiliki waktu penyinaran matahari yang berbeda-beda. Berdasarkan data *Indonesia Energy Outlook 2016* yang dipublikasikan oleh Dewan Energi Nasional, wilayah barat dan timur Indonesia memiliki potensi penyinaran paling besar. Dengan area wilayah timur Indonesia melingkupi Aceh, Sumatera Barat, Sumatera Utara, Riau, Bengkulu, Jambi, dan Kepulauan Riau memiliki rata-rata waktu penyinaran matahari selama 5 jam. Dan area wilayah barat melingkupi Papua, Maluku, Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, dan Sulawesi dengan rata-rata waktu penyinaran matahari selama 4,5 – 4,8 jam dalam satu hari. Sedangkan wilayah Pulau Jawa memiliki lama penyinaran paling sedikit, yaitu 3 – 3,5 jam. Dan untuk wilayah Jawa Barat dan Jawa Timur selama 4 jam per hari (Dewan Energi Nasional 2016). Peta radiasi matahari di Indonesia pada Gambar 2.2 menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Indonesia memiliki rata-rata jangka panjang intensitas cahaya matahari yang potensial untuk menghasilkan listrik lebih dari 1.600 kWh per meter persegi. Indonesia menjadi negara dengan prospek yang baik untuk pengembangan teknologi fotovoltaik.



Gambar 2.2 Peta Radiasi Matahari di Indonesia

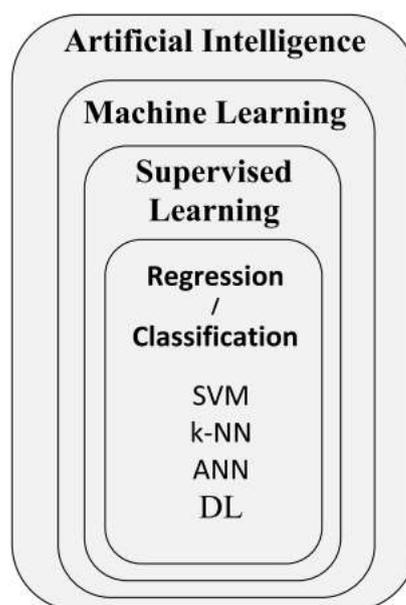
[sumber: <http://solargis.info>]

Dalam merancang sistem pembangkit listrik tenaga surya, perlu diketahui berapa banyak radiasi matahari yang tersedia di lokasi perencanaan. Radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi memiliki nilai yang sangat bervariasi karena bergantung pada kondisi atmosfer, kondisi geografis, dan musim dari lokasi perencanaan. Faktor-faktor tersebut dapat mempengaruhi kinerja dan keluaran dari pembangkit listrik tenaga surya (Brownson 2014). Data radiasi matahari diukur di sejumlah stasiun bumi di seluruh dunia tetapi karena tingkat iradiasi matahari dapat bervariasi secara drastis dengan medan, vegetasi, struktur tanah, dan cuaca, dalam kebanyakan kasus tidak akurat hanya menggunakan stasiun cuaca terdekat dalam analisis seseorang. Studi telah menemukan bahwa data radiasi matahari yang dikumpulkan dari stasiun 20-30 kilometer dari proyek dapat memiliki kesalahan kuadrat akar rata-rata sebanyak 25 persen (Perez dkk. 1987).

Penelitian mengenai prediksi radiasi matahari telah banyak dilakukan. Beberapa studi telah mengadopsi algoritma pembelajaran mesin dalam memprediksi radiasi matahari di berbagai wilayah di dunia baik secara konvensional maupun berbasis *artificial intelligence* telah banyak dikembangkan, seperti regresi, SVM (*Support Vector Machine*), ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*), serta JST (Jaringan Syaraf Tiruan) dengan berbagai topologi, seperti *Generalized Neuron Network* (GRNN), *a Feed-forward Backpropagation* (FFNN), *a Cascade-forward Backpropagation* (CFNN), dan *Elman Backpropagation* (ELMNN) (Leholo dkk. 2019; Khatib, Mohamed, Sopian, dkk. 2012).

Metode jaringan syaraf tiruan telah banyak diuji keakuratannya dalam berbagai implementasi kasus studi. Langkah pertama dalam penelitian inipun mengadopsi metode jaringan syaraf tiruan sebagai algoritma untuk memprediksi radiasi matahari di Provinsi Jawa Tengah. Akurasi metode JST dikuatkan oleh studi komparasi dan evaluasi terbaru berjudul

“*Prediction of Daily Global Solar Radiation using Machine Learning Algorithms*” yang diteliti oleh Agbulut *dkk.*, (2021) mengulas berbagai metode prediksi radiasi matahari. Untuk memberikan informasi terkait pemilihan wilayah, pemilihan desain sistem konversi energi, dan memudahkan pemilihan investasi dalam bidang energi terbarukan, Agbulut *dkk* memprediksi data radiasi matahari global harian pada empat provinsi di Turki (Kırklareli, Tokat, Nevşehir dan Karaman) yang memiliki distribusi radiasi matahari berbeda. Dalam studi tersebut, diuji dan dievaluasi empat algoritma *machine learning* yang berbeda yaitu: *Support Vector Machine* (SVM), Jaringan Saraf Tiruan (JST), *Kernel and Nearest-neighbor* (k-NN), dan *Deep Learning* (DL). Beberapa data input yang digunakan sebagai *data training* meliputi: suhu lingkungan minimum dan maksimum harian, *cloud cover*, radiasi matahari ekstraterrestrial harian, panjang hari dan radiasi matahari dari provinsi-provinsi. Data dipasok dari *Turkish State Meteorological Service* yang mencakup dua tahun terakhir (01 Januari 2018 hingga 31 Desember 2019).

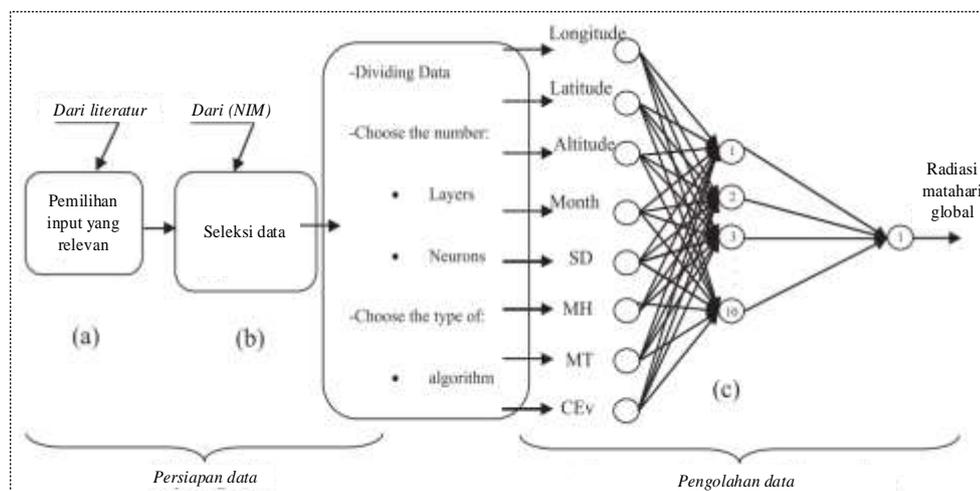


Gambar 2.3 Struktur jaringan MLP pada JST

Evaluasi keempat algoritma tersebut dilakukan dengan tujuh metrik statistik yaitu R^2 , RMSE, rRMSE, MBE, MABE, t-stat, dan MAPE. Hasil penelitian menunjukkan bahwa R^2 , MABE, dan RMSE dari semua algoritma masing-masing berkisar dari 0,855 hingga 0,936, dari 1,870 hingga 2,328 MJ/m², dari 2.273 hingga 2.820 MJ/m². Pada semua kasus, k-NN menunjukkan hasil terburuk dalam hal R^2 , RMSE, dan MABE. Dari semua model, *Deep Learning* adalah satu-satunya model yang melebihi nilai t-kritik. Studi ini menyimpulkan bahwa semua algoritma *machine learning* yang diuji dalam penelitian ini dapat digunakan dalam prediksi data radiasi matahari global harian dengan akurasi yang tinggi. Dalam urutan peringkat, algoritma ANN adalah algoritma yang paling cocok diantara semua algoritma. Kemudian diikuti oleh DL, SVM dan k-NN.

Dalam implementasinya, prediksi radiasi matahari berbasis metode jaringan syaraf tiruan salah satunya dilakukan oleh Loghmari dkk., (2018). Dalam penelitiannya yang berjudul “*Performance Comparison of Two Global Solar Radiation Models for Spatial Interpolation Purposes*”, Loghmari dkk bertujuan memprediksi radiasi matahari global dalam jarak lebih dari 50km di Tunisia, Afrika Utara. Dalam penelitian tersebut, dua model interpolasi spasial untuk radiasi matahari global bulanan yaitu Jaringan Syaraf Tiruan (JST) dan *Inverse Distance Weighting Model* (IDW) telah dikembangkan dan dievaluasi. Penelitian ini berhasil menyelidiki perilaku kedua model untuk kondisi iklim yang berbeda melalui dua skenario. Model JST menggunakan input data meteorologi yang tersedia di wilayah yang ditargetkan sementara model IDW menggunakan radiasi matahari global yang diukur di wilayah tetangga. Untuk membangun dan memvalidasi model, data-data terkait telah dikumpulkan selama 5 tahun berturut-turut (2008-2012), nilai bulanan dari 5 parameter meteorologi yang berbeda dari 10 stasiun meteorologi yang terletak di selatan dan pusat Tunisia.

Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa jumlah sampel yang dilatih dengan JST untuk memprediksi radiasi matahari global lebih signifikan daripada kondisi iklim dari mana sampel diambil. Namun, hasil data input dari lokasi yang memiliki kondisi iklim yang mirip dengan wilayah yang diprediksi meningkatkan akurasi model IDW. Untuk model JST yang dikembangkan, nilai RMS tercatat sebesar 6,4%, sedangkan untuk model IDW jumlahnya mencapai 5,11%.

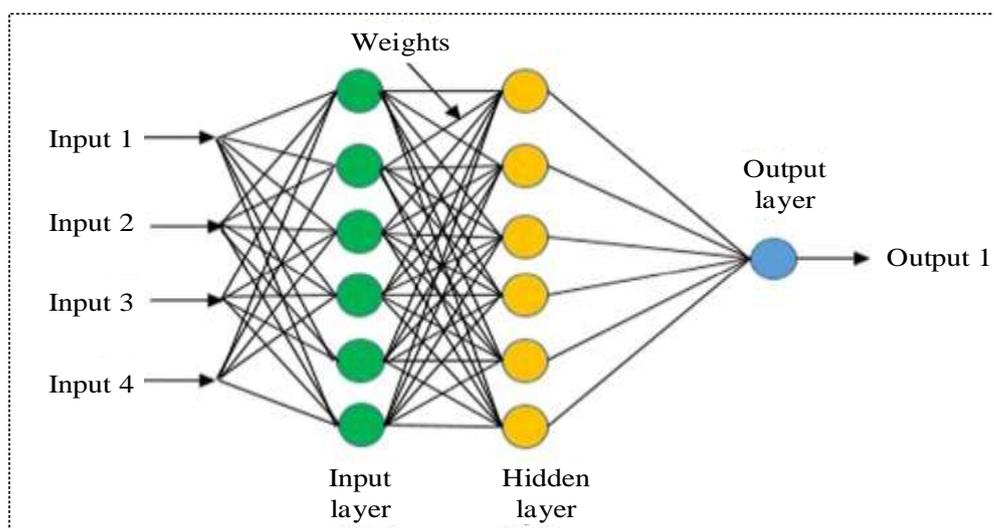


Gambar 2.4 Implementasi JST dalam prediksi radiasi matahari

(Loghmari dkk. 2018)

Akurasi dari pemodelan jaringan syaraf tiruan dinilai kuat juga oleh penelitian yang dilakukan oleh Shuvho dkk., (2019) dalam studinya yang berjudul “*Performance od Solar Irradiation and Performance Evaluation of Grid Connecte Solar 80kWp PV Plant in Bangladesh*”. Shuvo dkk melakukan investigasi performa PLTS kapasitas 80 kWp dengan memprediksikan iradiasi matahari di Dhaka, Bangladesh sebagai lokasi studi kasus menggunakan logika fuzzy dan JST guna memastikan keamanan energi terbarukan.

Hubungan antara parameter input (suhu, kecepatan angin dan kelembaban) dengan parameter output (sudut dan iradiasi) dijadikan sebagai pertimbangan dengan logika fuzzy. *Multilayer Perceptron* pada *back-propagation* JST dengan 1 *hidden layer* digunakan untuk memprediksi iradiasi matahari bulanan di lokasi dengan parameter input: suhu udara, kelembaban, tekanan atmosfer, kecepatan angin dan suhu bumi. Dari penelitian tersebut, diketahui bahwa keakuratan model logika fuzzy diperoleh sebesar 97,47% dan akurasi model JST diperoleh sebesar 98,78% dengan iradiasi aktual. Sehingga disimpulkan bahwa kinerja model JST lebih baik dari model logika fuzzy untuk prediksi iradiasi surya.

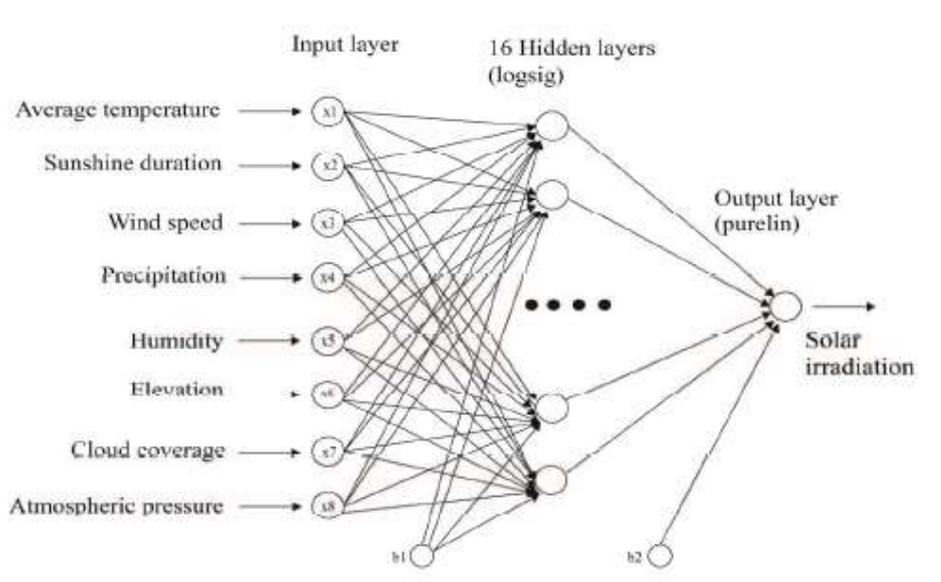


Gambar 2.5 Struktur jaringan MLP pada JST

(Shuvho dkk. 2019)

Keberhasilan metode JST dalam memprediksi nilai radiasi matahari telah dibuktikan oleh Rabbi dkk., (2016). Studi berjudul “*Prediction of Solar Irradiation in Bangladesh using Artificial Neural Network and Data Mapping using GIS Technology*” memanfaatkan metode JST untuk memprediksi potensi energi matahari bulanan di Bangladesh. Karena kurangnya instrumen pengukuran yang sesuai, metode JST digunakan sebagai platform pengukuran yang

bagus untuk insinyur surya untuk merancang pembangkit listrik tenaga surya. Dalam implementasinya, data yang digunakan diambil dari *database* NASA selama 22 tahun terakhir, dari tahun 1983 hingga 2005 di delapan kota. Model ini dikembangkan untuk delapan kota divisi di Bangladesh yaitu Dhaka, Chittagong, Barisal, Khulna, Mymensingh, Rajshahi, Rangpur dan Sylhet. Algoritma *Multi-layered Feed Forward* dengan JST empat lapis diuji dengan delapan variabel input independen yaitu suhu rata-rata, durasi sinar matahari, kecepatan angin, curah hujan, kelembaban, ketinggian, cakupan awan dan tekanan atmosfer untuk memprediksi iradiasi matahari bulanan. Data dari enam kota digunakan untuk pelatihan dan dua kota lainnya kota dipertimbangkan untuk pengujian dan validasi. Model ini dapat digunakan untuk memprediksi iradiasi matahari di Bangladesh dan untuk memberikan informasi yang cukup tentang kelayakan solar proyek bertenaga. Model tersebut dilatih untuk 70% dari total kumpulan data, sementara 15% data telah digunakan untuk pengujian dan 15% sisanya untuk validasi. Model terlatih digunakan untuk memprediksi iradiasi matahari Daraka & Chittagong dalam menentukan akurasi. 14 kombinasi struktur diuji dan kesalahan persentase absolut rata-rata (MAPE) telah diperoleh untuk masing-masing kombinasi. Dari ke-14 kombinasi struktur tersebut, terpilih struktur yang memiliki nilai MAPE terendah dengan 16 *hidden layer*. Dari penelitian tersebut ditemukan bahwa model prediksi yang dikembangkan oleh Rabbi dkk berlaku baik dengan nilai-nilai yang diujikan.



Gambar 2.6 Struktur JST dengan 16 Hidden Layer
(Rabbi dkk. 2016)

Di Indonesia, penelitian mengenai prediksi radiasi matahari telah dilakukan oleh Prastawa & Dalimi, (2013). Studi Prastawa dan Dalimi yang berjudul “*New Approach on Renewable Energy Solar Power Prediction in Indonesia based on Artificial Neural Network Technique*” berhasil mengembangkan penelitian berbasis ANN untuk memprediksi GSR di wilayah barat dan selatan Sulawesi. Lokasi tersebut dipilih untuk studi kasus dengan alasan minimnya ketersediaan data meteorologi dan data pengukuran radiasi matahari. Model yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah *Multi-Layer Feed Forward* (MLFF) pada JST, dengan model pelatihan *Back-propagation*. Data geografis dan meteorologi yang umum tersedia adalah digunakan sebagai basis input model: jam matahari, lintang, bujur, ketinggian, suhu udara maksimum dan minimum, kelembaban, dan curah hujan. Untuk meningkatkan model dalam menangkap musim periode, bulan dari data terkait juga dimasukkan. Lima lokasi dipilih di Wilayah Selatan Sulawesi sebagai studi kasus. Data dari empat lokasi digunakan

untuk mengembangkan model JST, sedangkan kumpulan data dari satu sama lain lokasi digunakan untuk memvalidasi model. Data diambil dari 5 lokasi. 4 data tersebut secara acak digunakan untuk mengembangkan ANN. Terdapat 288 data point dari keempat lokasi tersebut, dimana 50% data digunakan sebagai *data training*, 25% *data testing* dan 25% untuk *data validation*. Beberapa konfigurasi jumlah node dan lapisan diuji untuk mendapatkan yang terbaik konfigurasi, karena ini tidak dapat dilakukan secara deterministik. Lima kombinasi struktur JST diuji dengan 1 sampai 5 lapisan tersembunyi masing-masing dievaluasi menggunakan 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 node.

Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa 4 *hidden layer* dengan 5 node merupakan struktur jaringan yang terbaik. Struktur tersebut memiliki nilai MSE sebesar 0,003, nilai r sebesar 0,99958. Model yang dikembangkan berhasil digunakan sebagai alat prediksi karena kinerjanya menunjukkan hasil yang memuaskan. MPE tersebut dan r^2 model masing-masing adalah 0,1472% dan 0,999967.

Variasi model, algoritma pelatihan dan struktur jaringan syaraf tiruan banyak dikembangkan dalam berbagai penelitian, terutama penelitian terkait dengan prediksi radiasi matahari. Dimulai dengan *single* algoritma pelatihan seperti *Levenberg-Maquardt* yang diuji pada penelitian Rodríguez dkk. (2018); Çelik dkk. (2016); Chiteka dkk. (2016); Renno dkk. (2016); Shaddel dkk. (2016), algoritma pelatihan *Multilayer perceptron* yang digunakan dalam penelitian Ihya dkk. (2015); Gutierrez-corea dkk. (2016); Alsina dkk. (2016); Vakili dkk. (2015); Dahmani dkk. (2016), serta algoritma back-propagation yang diuji oleh Zou dkk. (2016); Neelamegam dkk. (2016); Alsina dkk. (2016); Meenal dkk. (2017); Manoel dkk. (2016); Laidi dkk. (2017); Xue (2017).

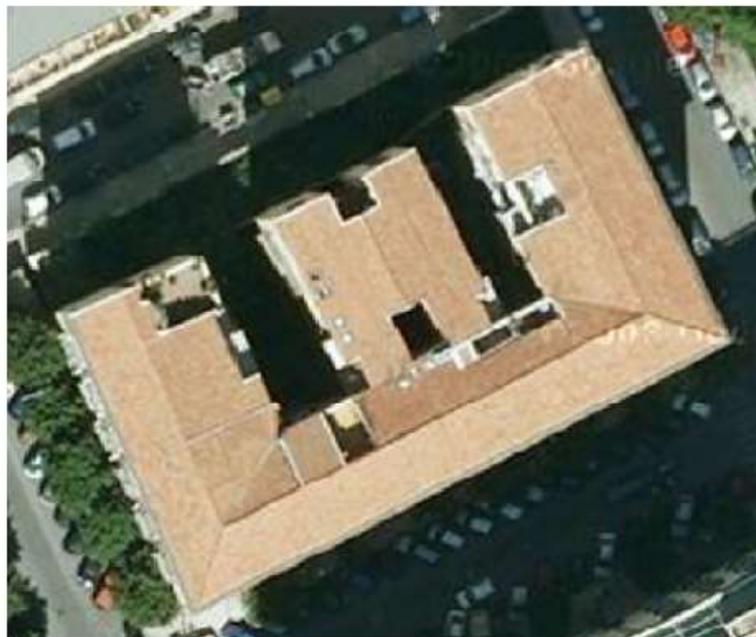
Semakin berkembang waktu, algoritma pelatihan JST banyak dikembangkan dan divariasikan. Sebagai contoh, kombinasi tiga jenis algoritma pelatihan *Feed-forward Multilayer Perceptron* digunakan oleh Khatib, Mohamed, Mahmoud, dkk. (2012) dalam penelitiannya yang berjudul “*An Assessment of Diffuse Solar Energy Models in Terms of Estimation Accuracy*”. Algoritma pelatihan *Feed-forward Back-propagation* dikembangkan Waewsak dkk. (2013) dalam penelitiannya yang berjudul “*Estimation of Monthly Mean Daily Global Solar Radiation over Bangkok, Thailand using Artificial Neural Networks*” dan Anwar dkk. (2018) dalam studinya berjudul “*Prediction of daily diffuse solar radiation using artificial neural networks*”. Kombinasi algoritma pelatihan *Levenberg Marquardt* dan *Back-propagation* digunakan dalam penelitian Meenal dkk. (2017) di studi ilmiahnya yang berjudul “*Assessment of SVM, Empirical and ANN based solar radiation prediction models with most influencing input parameters*”. Kombinasi tiga jenis algoritma pelatihan juga dikembangkan oleh (Anwar dkk. 2018) dalam penelitian yang berjudul “*Use of Artificial Neural Networks for Prediction of Solar Energy Potential in Southern States of India*”. Penelitian tersebut mengkombinasikan algoritma *Multilayer perceptron*, *Feed-forward* dengan *back-propagation* (FBPNN) untuk estimasi potensi energi di India.

Studi mengenai prediksi iradiasi matahari berbasis model jaringan saraf tiruan dengan beragam kelebihan telah banyak diulas sehingga memotivasi untuk mengadopsi model tersebut dan memodifikasi untuk penelitian iradiasi wilayah Provinsi Jawa Tengah. Lebih lanjut, penelitian ini memperhatikan pula akurasi prediksi model jaringan syaraf tiruanyang dikembangkan Agbulut dkk., (2021; Rabbi dkk., (2016), Prastawa & Dalimi, (2013). Data input jaringan untuk pengkajian dalam penelitian ini mengadopsi studi yang dilakukan Agbulut dkk., (2021; Behrang dkk., (2010); Rabbi dkk., (2016) **serta** Prastawa & Dalimi, (2013).

B. Estimasi Luas Area Atap Permukiman

Penelitian ini berupaya menghitung potensi fotovoltaik untuk atap rumah di 29 Kabupaten dan 6 Kota Madaia Provinsi Jawa Tengah sebagai langkah lanjut dari prediksi iradiasi matahari yang telah dilakukan. Pada tahapan ini diperlukan perhitungan jumlah ruang atap di area studi kasus. Sebagaimana dijelaskan oleh (Jakubiec dkk. 2012), dua komponen yang paling penting untuk menghitung potensi fotovoltaik meliputi jumlah radiasi matahari mencapai permukaan atap dan jumlah area atap yang tersedia diinstalasi panel surya fotovoltaik.

Penggunaan citra satelit sangat diperlukan pada tahap ini. Beberapa penelitian terdahulu telah memanfaatkan citra satelit untuk berbagai kasus. Cellura dkk., (2012) memanfaatkan citra satelit dari Google Earth™ dalam mengembangkan metodologi penilaian sistem fotovoltaik di perkotaan dalam studinya yang berjudul “*Photovoltaic Electricity Scenario Analysis in Urban Contest: An Italian Case Study*”.



Gambar 2.7 Salah satu atap miring pada lokasi studi kasus

(Cellura dkk. 2012)

Google Earth™ dimanfaatkan untuk menyediakan gambar satelit dari atap bangunan atau jumlahnya lantai melalui fungsi *Street View*. Penerapan metodologi telah diuji pada daerah perkotaan yang dipilih dari kota Palermo di Italia Selatan. Citra satelit mengklasifikasikan atap menurut bentuk, orientasi dan tinggi bangunan dengan morfologi yang berbeda, serta mengkalkulasi area atap bangunan bertingkat dengan mengklasifikasikan atap miring, atap datar, atap teras dan atap lainnya. Kemudian mencocokkan area atarhadap besar luas lantai bangunan dan diperoleh proporsi area atap sekitar 55%; 34.9%; 10% dan 0.1% ; secara berturut-turut untuk atap miring, datar, teras dan atap lainnya. Sebagian besar area atap miring berada pada bangunan berlantai 4, sedangkan area atap datar dimiliki bangunan berlantai 8. Sehingga bagian energi yang dihasilkan sistem PV yang dapat dipasang dievaluasi dengan memperhatikan jumlah lantai.

Selain itu, sejumlah penulis di seluruh dunia telah mengeksplorasi hubungan antara kepadatan populasi dan luas atap. Izquierdo dkk. (2008) menggunakan data yang dapat diakses seperti populasi, penggunaan lahan dan kepadatan bangunan dan mengeksplorasi hubungan mereka dengan area atap di Spanyol.

Studi lain yang menarik perhatian diselesaikan oleh Wiginton dkk., (2010) untuk provinsi Ontario, Kanada. Studi berjudul “*Quantifying Rooftop Solar Photovoltaic Potential for Regional*” ini merancang prosedur lima langkah untuk mengatasi data atap yang terbatas. Area penelitian pertama-tama dikelompokkan berdasarkan kepadatan populasi rendah, sedang, dan tinggi. Sampel representatif kemudian dipilih dari kelas bertingkat untuk mencerminkan distribusi kepadatan populasi di dalam untuk mengisolasi atap rumah dalam set sampel berdasarkan ortofoto resolusi tinggi yang tersedia. Area atap diplot terhadap kepadatan populasi untuk menentukan hubungan yang ada. Karena aspek analisis menggunakan pendekatan

integral, potensi sistem fotovoltaik tidak di-georeferensi, melainkan disajikan sebagai nilai aglomerasi.

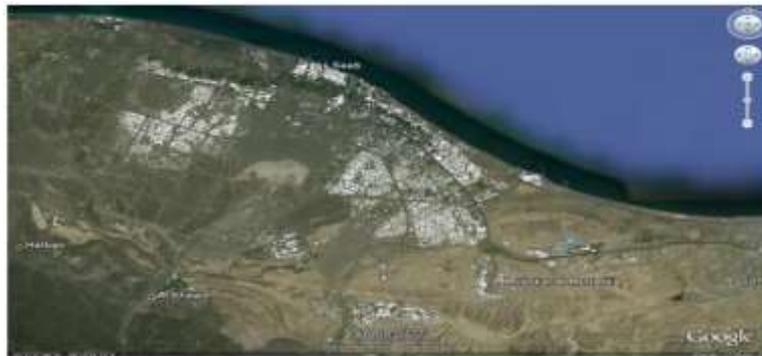
Berdasarkan prosedur tersebut, didapatkan kesimpulan bahwa hubungan antara total luas atap dan populasi di seluruh wilayah Ontario sebesar $70,0 \text{ m}^2/\text{kapita}$, setara dengan $\pm 6,2\%$ meskipun analisis bertingkat menunjukkan luas atap per kapita menurun dengan meningkatnya kepadatan populasi. Persamaan dibangun dari set sampel ini analisis digunakan untuk ekstrapolasi untuk memperkirakan luas atap kotor untuk seluruh wilayah. Studi ini berlanjut untuk mengurangi keseluruhan area atap untuk memperhitungkan area yang dapat digunakan berdasarkan karakteristik atap perumahan dan komersial dalam set sampel. Dengan atap yang sesuai ditutup modul fotovoltaik surya komersial, potensi output daya puncak modul fotovoltaik dari wilayah yang dipertimbangkan adalah $5,74 \text{ GW}$ (setara dengan 157% dari permintaan daya puncak) dan potensi produksi energi tahunan adalah 6909 GWh (5% dari total permintaan tahunan Ontario). Ini menunjukkan bahwa 30% dari permintaan energi Ontario dapat dipenuhi dengan penyebaran modul fotovoltaik di seluruh atap provinsi.



Gambar 2.8 Hasil ekstraksi lahan atap berbasis AFE (*Automated Feature Extraction*)

(Wiginton dkk. 2010)

Penggunaan area atap pada bangunan dapat dimaksimalkan untuk memanfaatkan sistem fotovoltaik. Potensi area atap bangunan dapat diperkirakan menggunakan sistem informasi geografis (SIG). Charabi dkk., (2010) dalam penelitiannya yang berjudul “*GIS-based estimation of roof-PV capacity & energy production for the Seeb region in Oman*” mengimplementasikan SIG untuk menilai potensi tenaga surya dalam sistem fotovoltaik terintegrasi dengan atap menggunakan pemrograman MATLAB dengan studi kasus di Muscat-Oman, Seeb. Total area atap diestimasi menggunakan bantuan Google Earth, kemudian area atap potensial tersebut dianalisis menggunakan ArcGIS untuk dihitung total luas atap tersedia. Pemrograman MATLAB dikembangkan untuk memperkirakan luas atap yang dapat dieksploitasi dengan memperhitungkan jarak dari tepi atap dan efek *shading* di antara deretan modul surya.



Gambar 2.9 Hasil ekstraksi bangunan atap dari Google Earth

(Charabi dkk. 2010)

Menggunakan modul perhitungan radiasi matahari ArcGIS, matahari radiasi dihitung untuk wilayah Seeb. Radiasi matahari harian rata-rata dan luas total modul surya yang berkaitan dengan efisiensi dan efek suhu digunakan untuk menghasilkan perkiraan untuk total potensial rata-rata harian listrik generasi 300MW. Dengan mempertimbangkan waktu rata-rata sinar matahari harian selama 10 jam, penelitian tersebut menegaskan fakta bahwa ada potensi teknis

yang sangat tinggi untuk penggunaan sistem atap-PV di Oman. Diperkirakan total sistem fotovoltaik terintegrasi di atap perumahan tersebut setara dengan PLTS berkapasitas 300 MW.

Dari banyak penelitian yang telah dipaparkan, estimasi luasan atap permukiman di Provinsi Jawa Tengah menjadi relevan mengadopsi konsep penelitian Charabi *dkk.*, (2010); Wiginton *dkk.*, (2010); dan Cellura *dkk.*, (2012). Meskipun demikian, dalam implementasinya pengembangan penelitian ini menggunakan citra satelit Sentinel 2A MSI dan peta rencana tata ruang wilayah Provinsi Jawa Tengah sebagai basis estimasi area atap permukiman.

C. Produksi Energi Listrik Sistem Atap Fotovoltaik Permukiman

Teknologi fotovoltaik berbasis modul surya menjadi pemanfaatan teknologi energi terbarukan yang menjanjikan (Bojic *dkk.* 2016). Teknologi tersebut sedang gencar untuk diterapkan dan akan mengalami peningkatan penggunaan dimasa depan karena terbukti dapat menjadi jenis sumber daya nol emisi, nol kebisingan dan memiliki keandalan untuk diterapkan di berbagai negara, termasuk Indonesia . Produksi modul surya global mencapai 40% dalam kurun 8 waktu terakhir. Hal tersebut menandakan pasar modul surya memiliki pertumbuhan yang cukup pesat untuk menggantikan sumber energi listrik konvensional (Zeman 2010). Sebesar 303,1 GW energi listrik telah dibangkitkan oleh teknologi fotovoltaik hingga tahun 2016 (Parida *dkk.* 2011; International Energy Agency 2017). Nilai tersebut menyumbang 1,7% energi bersih dari total kebutuhan energi listrik dunia (Jäger-Waldau 2017).

Kekuatan utama pembangkit fotovoltaik di dunia terletak di beberapa negara maju pada tahun 2012, tujuh negara teratas memiliki 80% dari total kapasitas fotovoltaik di dunia. Perkembangan terbesar industri fotovoltaik ada di Eropa, di mana 68% kapasitas terpasang di dunia berada. Negara yang unggul di kawasan ini adalah Jerman, yang menyumbang sekitar

33% kapasitas dunia, diikuti oleh Italia, Spanyol dan Prancis. Dari negara-negara non-Eropa pada tahun 2012, pembangkit energi surya dengan kapasitas 7-10 GW berada di China, yaitu Amerika Serikat, dan Jepang. Dalam beberapa tahun terakhir, terutama perkembangan pesat energi surya telah terjadi di China, di mana kapasitas total pembangkit listrik fotovoltaik telah meningkat 10 kali dalam 2 tahun - dari 0,8 GW di tahun 2010 menjadi 8,3 GW pada tahun 2012. Menurut *Renewable Energy Policy Network* untuk abad ke-21 (REN21), pada tahun 2012 kapasitas terpasang tenaga panas matahari dunia adalah 255 GW daya termal (kebanyakan berasal dari China). Strukturnya didominasi oleh pembangkit listrik, yang bertujuan untuk memanaskan udara dan air (World Bank 2017; BPSR 2018).

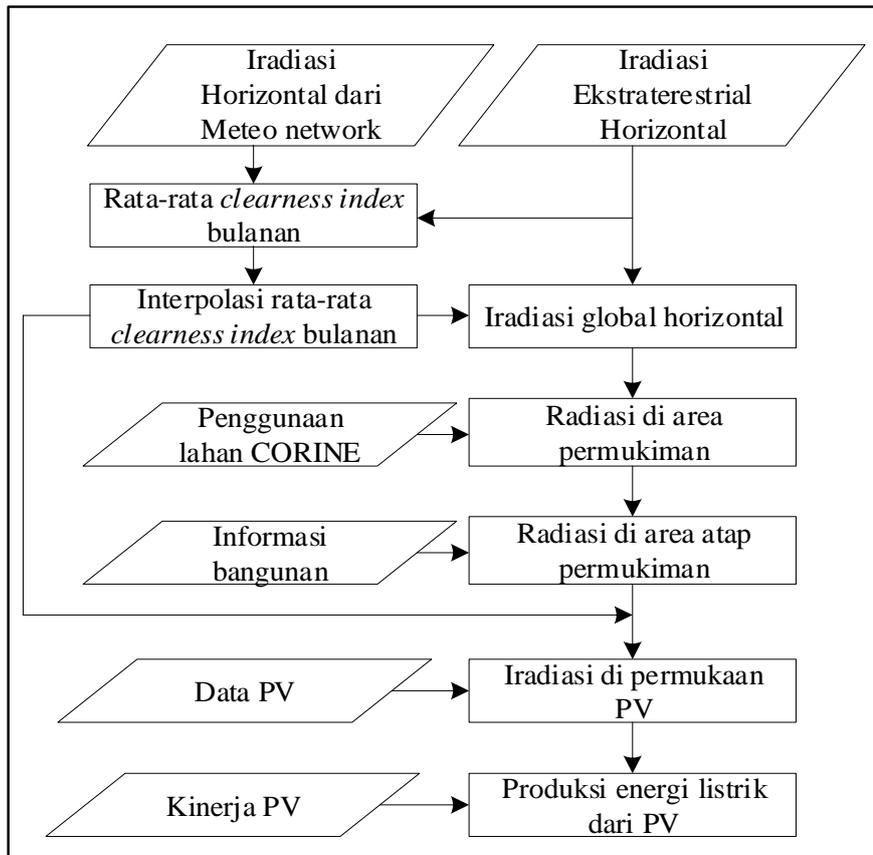
Beberapa negara telah mengembangkan kebijakan yang mendukung penggunaan teknologi fotovoltaik. Slovenia mengembangkan kebijakan energi sampai tahun 2020 dengan mengusulkan 25% kebutuhan energi berasal dari “*renewable energy source*”. Kebijakan energi *sustainable* memiliki keuntungan dalam aspek lingkungan, polusi dan perjanjian Kyoto. Diusulkan energi terbarukan mencapai 290 MW dengan proporsi solar energi 50 MW (Obrecht dkk. 2013).

Lahan bangunan kosong banyak dimanfaatkan untuk implementasi sistem fotovoltaik. *Building Attached Photovoltaic* (BAPV) dan *Building Integrated Photovoltaic* (BIPV) menjadi dua cara inovatif untuk mengimplementasikan teknologi fotovoltaik di lahan bangunan. Beberapa negara sudah menerapkan kedua cara tersebut. Jerman menerapkan undang-undang “*Rooftop Solar Electricity Programme*” untuk mendorong pengembangan BAPV. Jepang mensubsidi sepertiga biaya pemasangan fotovoltaik di bangunan perumahan, instalasi fotovoltaik yang sudah terhubung jaringan listrik Amerika meningkat menjadi 62 MW di tahun 2004 dan 36,5 MW di California (Hongxing dkk. 2019). Kedua sistem tersebut banyak

diterapkan area residensial yang sudah dibangun maupun yang sedang direncanakan (Spertino dkk. 2015; Gindi 2017; Dwi 2013; Hongxing dkk. 2019).

Perspektif hierarkis yang sering digunakan dalam praktik estimasi potensi sumber daya energi terbarukan. Sistem fotovoltaik surya atap sebagai sistem energi baru terbarukan telah banyak diimplementasikan secara meluas pada suatu bangunan. Penilaian potensi energi untuk kebutuhan energi di masa depan merupakan hal mendasar bagi lingkungan wilayah tertentu yang berkelanjutan, dan pengembangan kebijakan serta regulasi energi. Berbagai model sistem telah dikembangkan. Berkat peningkatan besar dalam kekuatan komputer dan teknik pemodelan, potensi geografis dan teknis surya di lanskap wilayah dapat diperkirakan, dianalisis, dan diwakili dalam skala kecil menggunakan perangkat lunak.

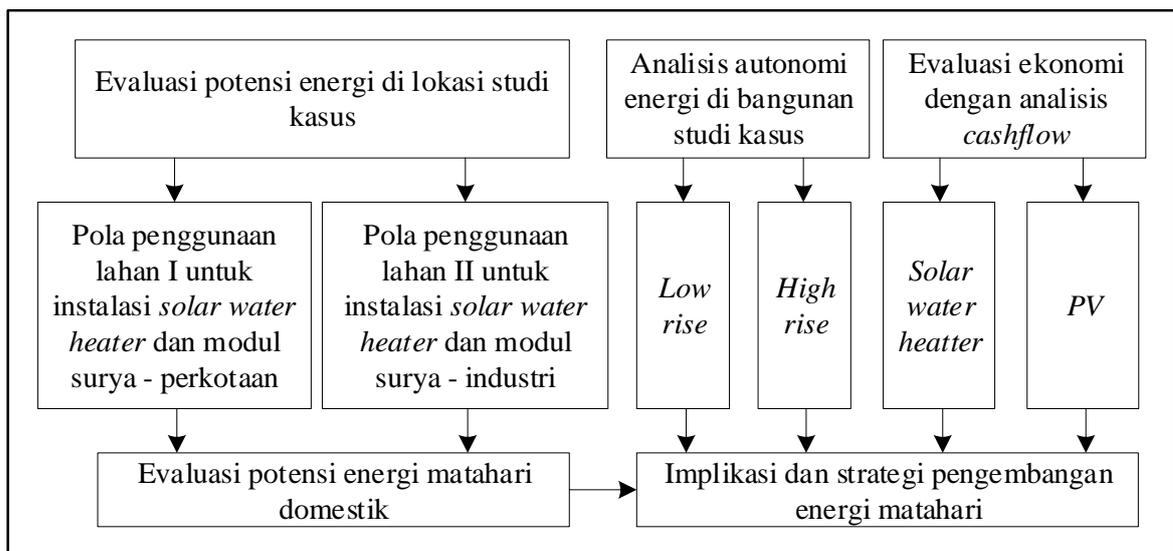
Izquierdo dkk. (2008) dalam penelitiannya yang berjudul “*A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations*” mengidentifikasi pendekatan hierarkis ketika mempelajari penggunaan sumber daya terbarukan tertentu seperti radiasi matahari, memperkenalkan pembatasan bertahap untuk menentukan berbagai tingkat potensi. Yang pertama adalah potensi fisik, yang meliputi jumlah maksimum energi matahari yang dapat diterima di area tertentu. Kemudian, potensi geografis dihitung dengan secara bertahap mengecualikan zona yang disediakan untuk penggunaan lain, membatasi lokasi dimana energi matahari dapat dikumpulkan. Akhirnya, potensi teknis memperhitungkan karakteristik teknis dari peralatan yang digunakan untuk konversi energi listrik. Hirarki dari penelitian tersebut ditampilkan pada Gambar 2.8. Potensi ekonomi dan potensi sosial juga dapat diinventarisir untuk menangani prospek penyebaran sumber daya matahari.



Gambar 2.10 Hirarki Estimasi Potensi Energi Listrik Berbasis Sistem Fotovoltaik (Izquierdo dkk. 2008)

Penelitian berjudul “*An evaluation of domestic solar energy potential in Taiwan incorporating land use analysis*” yang dikembangkan oleh Yue dkk., (2011) menggabungkan evaluasi sumber daya energi surya di Taiwan dengan analisis penggunaan lahan. Analisis tersebut mempertimbangkan kemungkinan potensi dan pembatasan eksploitasi energi surya yang dihasilkan dari kondisi penggunaan lahan lokal akibat kepadatan populasi di lokasi studi kasus. Evaluasi potensi dalam penelitian ini difokuskan pada pembangunan atap rumah yang mengacu pada analisis penggunaan lahan, mengingat bangunan menyediakan area potensial terbesar untuk pemasangan panel surya di area perkotaan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa pembangkit listrik fotovoltaik dan pemanas air tenaga surya memiliki potensi

menghasilkan 36,1 dan 10,2 TWh listrik dan energi termal setiap tahun di Taiwan, menyumbang 16,3% dan 127,5% dari total konsumsi listrik dan energi domestik untuk pemanas air rumah tangga pada tahun 2009, masing-masing. Namun, pembangkit tenaga surya fotovoltaik yang dieksploitasi pada tahun 2009 hanya menyumbang 0,02% dari total potensi di Taiwan, sedangkan pemanas air surya yang dieksploitasi menyumbang 11,6% dari total potensi.



Gambar 2.11 Estimasi Potensi Sistem Fotovoltaik di Taiwan

(Yue dkk. 2011)

Penelitian lainnya berjudul “*GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from Western Turkey*” dilakukan oleh Aydin dkk., (2013) memperkenalkan sebuah metodologi berbasis GIS, teori himpunan fuzzy dan pengambilan keputusan multi kriteria untuk menemukan penempatan optimal sistem energi terbarukan *solar-photovoltaic (PV) – wind energy hybrid*, yang berpotensi mengurangi kebutuhan akan penyimpanan energi. Argumen utama mereka bahwa tergantung pada kondisi cuaca dan iklim, sumber energi terbarukan saling melengkapi. Dengan kata lain, kelemahan dan kekuatan masing-masing sistem saling mengimbangi. Selanjutnya, Omिताomu dkk., (2012) menguraikan

pendekatan analisis keputusan multi kriteria yang disesuaikan dengan GIS untuk menentukan kesesuaian untuk lokasi pembangkit tenaga listrik baru. Metodologi ini mempertimbangkan beberapa aspek antara lain : aspek lingkungan, geologi, dan sosio-ekonomi. Walaupun pendekatan berbasis GIS ini dirancang untuk bekerja pada skala besar, namun secara spasial eksplisit bahwa pada studi tersebut, seluruh wilayah Amerika Serikat terbagi menjadi jutaan sel berukuran 100 m dengan sel 100 m dan menghitung kesesuaian setiap sel untuk situs pembangkit tenaga baru.

Langkah lanjut dalam penelitian ini mengadopsi dan memodifikasi dari penelitian-penelitian yang telah dipaparkan, yaitu analisis potensi pembangkit listrik berbasis energi matahari di Provinsi Jawa Tengah. Mengusung konsep dari Izquierdo *dkk.*, (2008); Cheng-Dar Yue, (2011); dan Aydin *dkk.*, (2013) yang memanfaatkan lahan terbuka maupun atap rumah sebagai lahan pemasangan panel surya, penelitian ini memodifikasi dengan meneliti lebih lanjut mengenai potensi mitigasi CO₂ akibat dari pemasangan panel surya yang akan ditinjau lebih detail pada sub-bab berikutnya.

Memahami radiasi matahari yang tersedia dan area atap adalah komponen penting ketika menghitung potensi listrik fotovoltaik tetapi ada juga pertimbangan teknologi untuk dipertimbangkan. Ini termasuk kemajuran panel fotovoltaik, kemiringan, dan perawatan yang tepat. Selain itu, perlu untuk memperhitungkan kerugian selama konversi dari arus searah yang dihasilkan fotovoltaik (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) yang dapat digunakan. National Renewable Energy Laboratory, (2013) menyarankan faktor derate standar 0,77 untuk memperhitungkan kerugian sistem berikut: inverter dan transformator, ketidakcocokan, dioda dan koneksi, kabel DC, kabel AC, kekotoran dan ketersediaan sistem. Seiring dengan perkembangan model perhitungan irradiansi. (Suri *dkk.* 2005) juga membuat database Sistem

Informasi Geografis (PV-GIS) Fotovoltaik untuk Eropa dan Afrika (Choi dkk. 2011). Alat web PV-GIS menggunakan persamaan berikut untuk menghitung potensi tahunan dari sistem fotovoltaik yang dipasang.

$$E = 365 P_k r_p H_{h,i} \quad (2.4)$$

Di mana E adalah potensi tahunan untuk pembangkit listrik dalam kilowatt hour (kWh), P_k adalah daya puncak dari peralatan yang dipasang dalam kilowatt (kW), r_p adalah rasio kinerja sistem atau faktor penurunan, dan $H_{h,i}$ adalah bulanan atau tahunan rata-rata radiasi global harian dalam watt-jam (Wh). Dalam pengembangan kalkulator web PVGIS berbasis r.sun, rasio kinerja sistem (r_p) yang digunakan untuk panel silikon mono dan polikristalin adalah 0,75 (Suri dkk. 2005). Ini juga sangat mirip dengan rumus Clark, Klein and Beckman, (1984) yang diterbitkan dalam Solar Energy pada tahun 1984, di mana variabel-variabel utama yang mempengaruhi potensi PV meliputi area photocell, rata-rata radiasi per jam bulanan, dan efisiensi rata-rata susunan (termasuk peralatan pengkondisian daya) .

Penilaian sumber daya surya dengan mengevaluasi energi sistem fotovoltaik, hampir berbanding lurus dengan total insiden radiasi matahari pada sistem. Ini mencakup radiasi langsung dari matahari dan radiasi ke bawah dari langit dan awan ke sistem. Yang terakhir memungkinkan sistem berpotensi menghasilkan energi listrik bahkan pada hari berawan (ADB, 2014). Kapasitas terpasang potensi sistem fotovoltaik atap dapat diestimasi menggunakan persamaan:

$$C_R = \left(\frac{C_M}{1000} \right) \times \left(\frac{RCR \cdot A_R}{A_M} \right) \quad (2.5)$$

Dimana, C_R : potensi kapasitas sistem fotovoltaik surya atap, kWp (kilo Watt Peak); C_M : kapasitas tiap modul surya, Watt; A_M : luas per satu modul surya, m²; A_R : total luas atap yang tersedia untuk instalasi modul surya, m²; dan RCR : rasio atap yang tertutupi modul surya.

Potensi energi dari sistem dapat diestimasi menggunakan persamaan berikut:

$$E = C_R \times IGH \times D \quad (2.6)$$

Dimana, C_R : kapasitas terpasang sistem fotovoltaik surya atap, kWp; IGH : irradiansi global horizontal yang mengenai permukaan atap, kWh.m⁻²; dan D : faktor penurunan karena proses konversi.

D. Potensi Mitigasi CO₂ Sistem AtapFotovoltaik Permukiman

Semua negara di dunia bergantung pada bahan bakar fosil untuk kebutuhan energinya. Namun kewajiban untuk mengurangi emisi CO₂ dan gas lainnya agar sesuai dengan kesepakatan Kyoto (*Kyoto agreement*) merupakan alasan di balik beralihnya berbagai negara ke sumber energi terbarukan. Saat ini konsumsi minyak dunia mencapai 76 juta barel. Terlepas dari konsekuensi pembakaran bahan bakar fosil yang diketahui berdampak terhadap lingkungan, hal ini diperkirakan akan meningkat menjadi 123 juta barel per hari pada tahun 2025. Di negara maju, konsumsi energi di sektor bangunan merupakan bagian utama dari total penggunaan energi. Hal ini diperkirakan sama dengan 40% dari total konsumsi energi di Uni Eropa. Sebagian besar dari jumlah ini digunakan untuk produksi air panas dan pemanasan ruang. Salah satu cara untuk mengurangi jumlah energi yang bersumber dari fosil ini adalah dengan menggunakan energi surya (Argiriou 1997). Teknologi energi terbarukan menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan dengan mengubah fenomena alam menjadi bentuk energi yang bermanfaat. Teknologi ini menggunakan energi surya dan efek langsung dan tidak langsungnya di bumi (radiasi matahari, angin dan air hujan), gaya gravitasi (pasang surut) dan panasnya bumi (panas bumi) sebagai sumber energi yang dihasilkan (Kalogirou 2004).

Manfaat terpenting dari sistem energi terbarukan yaitu mengurangi pencemaran lingkungan. Hal ini dapat dicapai dengan pengurangan emisi akibat berkurangnya penggunaan

bahan bakar konvensional. Polusi udara yang dihasilkan bahan bakar fosil dapat berdampak buruk bagi lingkungan alam dan kesehatan masyarakat (Diakoulaki dkk. 2001). Pada penelitian sebelumnya, untuk mengetahui manfaat lingkungan dari pemanfaatan energi matahari, dilakukan perkiraan emisi yang dihasilkan dari penggunaan energi surya dan kemudian dibandingkan dengan sistem bahan bakar konvensional. Jumlah emisi bergantung pada ukuran kolektor surya dan energi tambahan yang dibutuhkan dan dibandingkan dengan sistem energi non-surya yang menggunakan bahan bakar konvensional (Kalogirou 2004).

Teknologi fotovoltaik memberikan keuntungan lingkungan yang jelas dibandingkan sumber energi konvensional. Pengembangan teknologi energi surya berkontribusi pada pengembangan aktivitas manusia yang berkelanjutan (Tsoutsos dkk. 2005). Dari aspek lingkungan, penggunaan teknologi energi surya memiliki implikasi positif seperti (Tsoutsos dkk. 2005):

- a) Pengurangan emisi gas rumah kaca (terutama CO₂, NO_x) dan pencegahan emisi gas beracun (SO₂, partikulat).
- b) Reklamasi lahan dapat terdegradasi.
- c) Pengurangan jalur transmisi yang diperlukan dari jaringan listrik.
- d) Peningkatan kualitas sumber daya air.

Dalam sudut pandang sosio-ekonomi, manfaat teknologi energi surya terdiri dari:

- a) Peningkatan kemandirian energi regional / nasional.
- b) Penyediaan kesempatan kerja yang signifikan.
- c) Diversifikasi dan keamanan pasokan energi.
- d) Dukungan deregulasi pasar energi.
- e) Percepatan elektrifikasi pedesaan di negara-negara berkembang.

Tabel 2.1 Tingkat potensi dampak lingkungan dari teknologi surya

No	Permasalahan lingkungan	Solar Termal Terpusat	Solar Termal Terdistribusi	<i>Photovoltaic Power Generation Terpusat</i>	<i>Photovoltaic Power Generation Terdistribusi</i>	<i>Solar Thermal Electricity</i>
1.	Dampak visual	++	+	++	+	+++
2.	Pelepasan bahan kimia secara rutin dan tidak disengaja	+	++	+++	+++	++
3.	Penggunaan lahan	++	+	++	+	+++
4.	Hygiene dan sanitasi kerja	++	++	++	++	+++
5.	Dampak terhadap ekosistem	+		+		++
6.	Dampak terhadap sumber air	++	+	+	+	+++

Sumber: Tsoutsos dkk., (2005)

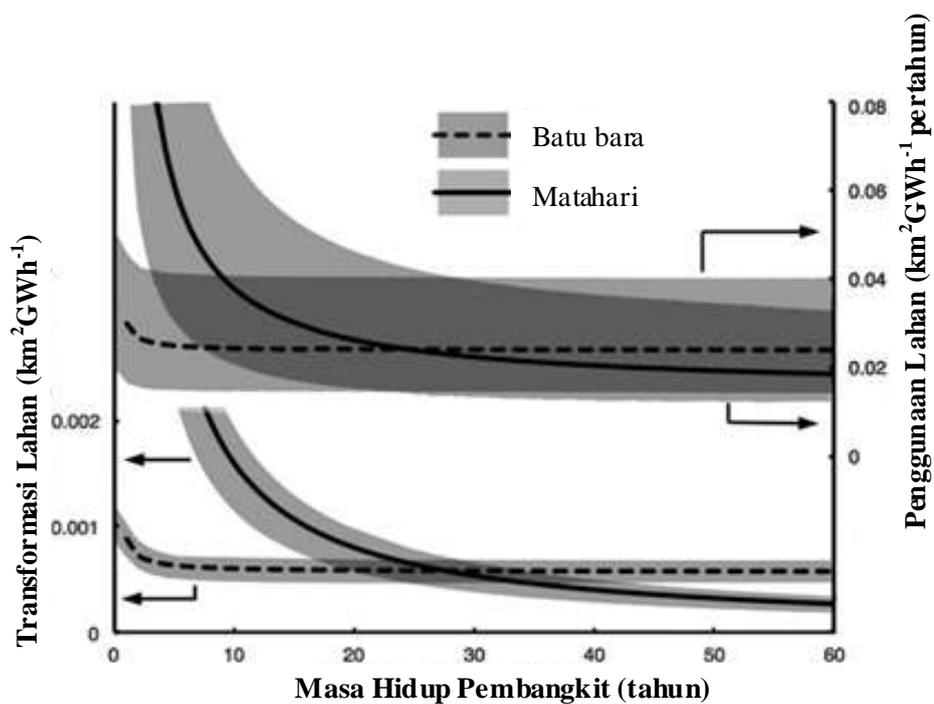
Tabel 2.2 Indikator lingkungan dan sosial dari *Solar Energy Technologies*

Indikator	<i>Central solar thermal</i>	<i>Distributed solar thermal</i>	<i>Central photovoltaic power generation</i>	<i>Distributed photovoltaic power generation</i>	<i>Solar thermal electricity</i>
Penyelamatan emisi CO ₂	1.4 kg/kWh atau 840 kg/m ₂	1.4 kg/kWh atau 840 kg/m ₂	0.6–1.0 kg/kWh	0.6–1.0 kg/kWh	Setiap tahun 688t/MW bila dibandingkan dengan pabrik siklus gabungan 1.360t/MW saat digabungkan ke pembangkit listrik tenaga batu bara
Pekerjaan produksi (EU wide)	4000 jobs/a	4000 jobs/a	2–3000 jobs/a	2–3000 jobs/a	1 pekerjaan tetap/MW untuk operasi + 10-15 pekerjaan/MW untuk konstruksi 12-18 bulan
Total pekerjaan	12,000 jobs/a	12,000 jobs/a	4–5000 jobs/a	4–5000 jobs/a	1000 pekerjaan tetap untuk 1000MW

Sumber: Tsoutsos dkk., (2005)

Hasil penelitian menemukan bahwa tenaga surya mengurangi polusi udara sebesar ~10%, dari tahun 2015 sampai 2050. Berdasarkan perhitungan tersebut, angka ini setara dengan nilai sekarang yang didiskontokan sebesar \$56-\$789 miliar (*central value of* ~\$250 miliar, setara dengan ~2¢ / kWh-solar) dalam *climate benefits* dan \$77 - \$298 miliar (*central value of* \$ 167 miliar, atau ~ 1.4 ¢/kWh-energi surya) dalam kualitas udara dan manfaat kesehatan masyarakat. Rentang nilai tersebut mencerminkan ketidakpastian tentang dampak emisi gas rumah kaca dan polutan udara. Tenaga surya juga ditemukan dapat mengurangi pengeboran air sebesar 4% dan konsumsi air sebesar 9%, termasuk di banyak negara yang rawan kekeringan (Wiser dkk. 2016).

Penelitian yang dilakukan Turney dkk., (2011) menunjukkan bahwa dampak lingkungan dari pembangunan dan operasi pembangkit listrik tenaga surya per kWh meningkat dengan insolasi yang lebih rendah di daerah berawan atau dataran tinggi. Hal ini disebabkan karena kurangnya daya listrik yang dihasilkan dari pembangkit listrik. Pembangkit listrik tenaga surya yang terletak di padang pasir dan lokasi lain dimana insolasi matahari sangat tinggi serta tidak ada satwa liar memiliki dampak lingkungan yang paling menguntungkan. Pada penelitiannya juga dilakukan perbandingan intensitas penggunaan lahan untuk PLTS skala besar dan pembangkit listrik batubara yang ditampilkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.12 Perbandingan penggunaan lahan PLTS dan pembangkit listrik batubara
 Sumber: (Turney dkk. 2011)

Pada Gambar 2.10, koordinat kiri menunjukkan transformasi tanah, dan koordinat kanan menunjukkan penggunaan tanah (*land occupation*). Untuk kedua ordinat garis putus-putus adalah hasil rata-rata pembangkit listrik tenaga batubara sedangkan garis padat adalah hasil

rata-rata pembangkit listrik tenaga surya. Area yang berwarna abu-abu memberikan kisaran sensitivitas perhitungan karena parameter masukan bervariasi berdasarkan nilai yang diperoleh. Pada gambar di atas menunjukkan plot perhitungan untuk metrik penggunaan lahan. Hasil untuk transformasi tanah menunjukkan keseimbangan antara matahari dan batubara pada 26 tahun, sedangkan untuk lahan pendudukan menunjukkan keseimbangan pada 24 tahun. Selanjutnya adalah metrik yang lebih banyak informasi karena mencakup informasi tentang masa pemulihan tanah setelah pembangunan dan operasi pembangkit listrik. Pada pembangkit fotovoltaik yang berumur 30 tahun terlihat menempati lahan kurang dari 1515 dibandingkan pembangkit listrik tenaga batubara pada usia yang sama. Seiring dengan bertambahnya usia pembangkit listrik, intensitas penggunaan tenaga fotovoltaik secara signifikan lebih kecil daripada batubara. Transformasi lahan per kapasitas pembangkit $\text{km}^2 \text{GW}^{-1}$ menunjukkan keseimbangan antara tenaga matahari dan batubara setelah 30 tahun, dengan rentang 27 sampai 40 tahun.

Penggunaan pembangkit listrik tenaga surya tidak mengeluarkan emisi gas rumah kaca ke atmosfer dan untuk 1 kWp pembangkit listrik tenaga surya akan mengurangi emisi gas CO_2 sebanyak 9,3 ton selama 25 tahun (Frankl 2002). Pada saat ini di seluruh Indonesia telah terpasang sebesar 12,1MWp pembangkit listrik tenaga surya. Oleh karena itu pembangkit ini akan berkontribusi untuk pengurangan gas CO_2 sebesar 112.530 ton selama 25 tahun. Prospek utama yang berkaitan dengan penelitian surya untuk mengurangi emisi karbon global, yang telah menjadi masalah lingkungan. Sebagai contoh, 696.544 metrik ton emisi CO_2 telah berkurang melalui pemasangan 113.533 tata surya rumah tangga di California, Amerika Serikat. Oleh karena itu, adopsi teknologi surya akan secara signifikan mengurangi masalah yang terkait dengan perubahan iklim.

E. Konsep Berwawasan Lingkungan

Pada era sekarang pembangunan secara terus menerus dilakukan di berbagai aspek, baik itu aspek ekonomi, aspek sosial, dan aspek-aspek lainnya. Salah satu hal yang menjadi perhatian dalam pembangunan merupakan aspek lingkungan. Lingkungan adalah salah satu hal yang penting untuk diperhatikan, karena lingkungan mencerminkan dan menggambarkan kondisi atau keadaan dalam suatu wilayah tertentu, sehingga dapat mencerminkan aktivitas, berperilaku masyarakat dalam wilayah tersebut Zaini dan Darmawanto, (2015). Lingkungan adalah kombinasi antara kondisi fisik yang mencakup keadaan sumber daya alam seperti tanah, air, energi surya, mineral, serta flora dan fauna yang tumbuh di atas tanah maupun di dalam lautan, dengan kelembagaan yang meliputi ciptaan manusia seperti keputusan bagaimana menggunakan lingkungan fisik tersebut. Segala sesuatu yang ada di sekitar kita yang terdiri atas lingkungan biotik dan lingkungan abiotik disebut lingkungan (Dwiyatmo 2007)

Dalam Undang-Undang Nomor 23 Tahun 1997 Pasal 1 Butir 3 berbunyi bahwa “Pembangunan berwawasan lingkungan adalah upaya sadar dan berencana menggunakan serta mengelola sumber daya secara bijaksana dalam pembangunan yang berkesinambungan untuk meningkatkan mutu hidup generasi masa kini dan masa depan”. Pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*) merupakan paradigma pembangunan yang berkaitan langsung dengan keseimbangan alam atau lingkungan (Mira 2014)

Menurut Sugandi dkk, (2007) model pembangunan berkelanjutan didasarkan atas tiga pilar utama yang ketiganya saling berkaitan, yaitu pertama, *society*, berkaitan peran masyarakat, responsibility (tanggung jawab), interaksi sosial, berperilaku masyarakat dan kondisi sosial masyarakat yang ada di suatu wilayah; kedua, *environment*, yaitu berkaitan dengan lingkungan alam, termasuk lingkungan fisik serta adanya seperangkat kelembagaan sebagai hasil buatan

manusia dalam rangka pemanfaatannya; ketiga, *economy*, yaitu kesejahteraan ekonomi masyarakat dan pemanfaatan lingkungan alam untuk memenuhi kebutuhan masyarakat termasuk dalam rangka memperoleh keuntungan.

Menurut Hariyadi yang dikutip oleh Zul Endria (2003) dalam buku *Management Sumber Daya Alam dan Lingkungan*, memberikan pengertian bahwa pembangunan berwawasan lingkungan memerlukan tatanan agar sumber daya alam dapat secara berlanjutan menunjang pembangunan, pada masa kini dan mendatang, generasi demi generasi dan khususnya dalam meningkatkan kualitas hidup manusia Indonesia. Menurut Yonathan Polungturan (2015:23-24) Dengan mengacu pada *The World Commission on Environmental and Development*, dinyatakan bahwa pembangunan berwawasan lingkungan adalah proses pembangunan yang dapat memenuhi kebutuhan generasi masa sekarang tanpa mengesampingkan atau mengorbankan.

Menurut Hartono (2009) Pembangunan berwawasan lingkungan pada dasarnya adalah suatu upaya pembangunan yang berjalan berkesinambungan atau pembangunan berkelanjutan. *Sustainable development* adalah suatu proses pembangunan yang memanfaatkan sumber daya alam dan sumber daya manusia sebesar-besarnya, dengan menyerasikan sumber daya alam dengan manusia sebagai subjek dan objek dalam pembangunan. Pandangan ini didasari oleh anggapan Hartono dalam Buku *Geografi, Jelajah Bumi dan Alam Semesta* pada tahun 2009, yaitu sebagai berikut: (1) Proses pembangunan harus terus-menerus ditopang oleh sumber daya alam yang selalu tersedia dan cukup, mutu lingkungan yang baik, serta bertahan dalam waktu cukup lama; (2) Sumber daya alam terutama udara, dan tanaman memiliki ambang batas yang penggunaannya akan menyusut baik kuantitas maupun kualitasnya; (3) Mutu atau kualitas lingkungan berhubungan langsung dengan mutu atau kualitas hidup, semakin baik kualitas mutu lingkungan maka semakin baik pada mutu atau kualitas hidup; (4) Pada penggunaan

sumber daya alam saat ini seharusnya memberikan kemungkinan berbagai pilihan penggunaan sumber daya alam dimasa mendatang, seperti bahan bakar untuk kendaraan bermotor tidak selamanya harus menggunakan bensin atau solar; (5) Pembangunan berkelanjutan harus merupakan solidaritas antar generasi, maksudnya sumber daya alam yang ada sekarang tidak hanya dihabiskan untuk kesejahteraan generasi saat ini, tetapi dapat diwariskan bagi kesejahteraan generasi yang akan datang.

Dalam pasal 1 butir ke 3 UUPLH 1982 yang berbunyi ”pembangunan berwawasan lingkungan adalah upaya sadar dan berencana menggunakan dan mengelola sumber daya secara bijaksana dalam pembangunan yang berkesinambungan untuk meningkatkan mutu hidup manusia dari masa ke masa”. Jadi maksudnya sumber daya pada butir 3 tersebut harus diartikan lebih luas yaitu, bukan hanya mencakup pengertian ekonomis seperti sumber daya alam atau sumber daya buatan, tetapi juga meliputi semua bagian lingkungan hidup kita sendiri, mulai dari sumber daya biotic (manusia, hewan,tumbuh-tumbuhan) sumber daya abiotik (air, udara, cahaya, tanah, barang-barang tambang dan lain-lain). Sampai pada sumber daya buatan (mesin, hasil-hasil industri, gedung, dan sebagainya). Dengan demikian, terdapat 3 unsur penting dalam prinsip pembangunan berwawasan lingkungan: (1) Penggunaan atau pengelolaan sumber daya secara bijaksana; (2) Menunjang pembangunan yang berkesinambungan; (3) Meningkatkan mutu hidup.

Menurut Sudharto P .Hadi (2001) dalam Pongtuluran (2015:29-31) mengemukakan bahwa terdapat 4 prinsip umum dalam pembangunan berwawasan lingkungan, yaitu: (1) Pemenuhan kebutuhan dasar, baik materi maupun nonmateri; (2) Pemeliharaan lingkungan; (3) Keadilan social; (4) Penentuan nasib sendiri. Sementara itu, Emil Salim (1990) dalam buku manajemen sumber daya alam dan lingkungan (2015:24-25) mengemukakan bahwa terdapat 5

(lima) tujuan yang perlu dikembangkan dengan sungguh-sungguh untuk melaksanakan pembangunan yang berwawasan lingkungan, yaitu: (1) Menumbuhkan sikap kerja berdasarkan kesadaran saling membutuhkan antara satu dengan yang lain; (2) Kemampuan menyerasikan kebutuhan dengan kemampuan sumber daya alam dalam menghasilkan barang dan jasa; (3) Tantangan pembangunan tanpa merusak lingkungan; (4) Mengembangkan kesadaran lingkungan di kalangan masyarakat, sehingga tumbuh menjadi kesadaran berbuat; (5) Menumbuhkan lembaga-lembaga swadaya masyarakat yang dapat mendayagunakan dirinya untuk menggalakkan partisipasi masyarakat dalam mencapai tujuan pengelolaan lingkungan hidup.

Dari uraian prinsip-prinsip pembangunan berwawasan lingkungan, nampak konsep ini menghendaki suatu perubahan dalam pola perilaku masyarakat. Dalam konteks pengembangan energi matahari sebagai sumber listrik berwawasan lingkungan di Provinsi Jawa Tengah membutuhkan suatu prinsip yang menjaga keberadaan lingkungan wilayah lokal. Keberadaan wilayah yang mencakup 29 Kabupaten dan 6 Kota sangat penting dijaga kelestarian sumber daya alam. Aspek penting dari pengembangan energi matahari berwawasan lingkungan agar masyarakat diseluruh wilayah Jawa Tengah memanfaatkan sumber daya alam tidak merusak lingkungan. Pemberdayaan sumber daya matahari perlu memerhatikan menjaga keseimbangan komponen lingkungan seperti unsur abiotik, biotik dan kondisi sosial sebagai suatu ekosistem lingkungan tidak terganggu. Lebih lanjut Jawa Tengah memiliki budaya variasi warna yang lebih khas dari budaya lain. Budaya khas Jawa Tengah sering diekspresikan dalam adat istiadat, tradisi hingga kehidupan sehar-hari. Kesenian dan budayanya begitu tersohor hingga ke penjuru Tanah Air. Kearifan budaya lokal ini sangat penting sebagai wahana mendorong peran masyarakat dalam pengembangan energi matahari wilayah lokal sebagai sumber listrik.

