

**EVALUASI KINERJA JARINGAN SYARAF TIRUAN PADA
PENENTUAN TITIK MAKSIMUM PANEL SURYA BERTEKNOLOGI
KRISTAL DAN NON-KRISTAL SILIKON**

**PERFORMANCE EVALUATION OF ARTIFICIAL NEURAL
NETWORKS FOR ESTIMATION THE MAXIMUM POINT OF SOLAR
PANELS WITH CRYSTALLINE AND NON – CRYSTALLINE SILICON
TECHNOLOGY**

**YUNITA ARUM SARI
D032192004**



**PROGRAM STUDI S2 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TENKINK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
DESEMBER 2023**



**EVALUASI KINERJA JARINGAN SYARAF TIRUAN PADA
PENENTUAN TITIK MAKSIMUM PANEL SURYA BERBASIS
TEKNOLOGI KRISTAL DAN NON-KRISTAL SILIKON**

Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi
Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

Yunita Arum Sari
D032192004



**PROGRAM STUDI S2 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TENKINK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
DESEMBER 2023**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

**EVALUASI KINERJA JARINGAN SYARAF TIRUAN PADA
PENENTUAN TITIK MAKSIMUM PANEL SURYA BERBASIS
TEKNOLOGI KRISTAL DAN NON-KRISTAL SILIKON**

Disusun dan diajukan oleh

**YUNITA ARUM SARI
D032192004**

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Magister Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
Pada Tanggal 27 Desember 2023
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng., IPU
Nip. 19740530 199903 1 003

Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., IPM
Nip.19691026 199412 2 001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Ketua Program Studi
S2 Teknik Elektro



Prof. Dr. Eng. I Ramli, S.T., M.T., IPM
NIP. 19730926 200012 1 002

Dr. Eng. Ir. Wardi, S.T., M.Eng
NIP. 19720828 199903 1 003

Optimized using
trial version
www.balesio.com

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Yunita Arum Sari
Nomor Mahasiswa : D032192004
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 27 Desember 2023

Yang menyatakan



Yunita Arum sari



KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas berkenaan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan menyelesaikan tesis yang berjudul Evaluasi Kinerja Jaringan Syaraf Tiruan pada Penentuan Titik Maksimum Panel Surya Berbasis Teknologi Kristal dan Non-Kristal Silikon, semoga dapat memberi manfaat sebagai bahan referensi bagi para pembaca.

Dalam mengerjakan tesis ini penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Orang tua dan keluarga yang selalu berdoa dan sangat membantu mulai dari materi, semangat, dan motivasi sehingga penulis dapat mengerjakan Tesis ini dengan baik dan lancar.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin Makassar.
3. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.
4. Bapak Dr. Eng. Ir. Wardi, S.T., M.Eng. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin Makassar.
5. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng. selaku Pembimbing I yang telah banyak memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis untuk menyelesaikan Tesis dengan baik.
6. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. selaku Pembimbing II yang telah banyak memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis untuk menyelesaikan Tesis dengan baik.
7. Bapak dan Ibu dosen yang telah memberikan ilmunya kepada penulis dalam proses perkuliahan dikelas, serta para staf yang telah memberikan layanan administrasi dalam proses penyelesaian studi ini.
8. Rekan-rekan mahasiswa(i) S2 Teknik Elektro Angkatan 2019 dan semua pihak yang telah memberikan dorongan dan bantuan baik secara langsung maupun secara tidak langsung.

Akhir kata, penulis berharap semoga segala sesuatu yang telah dihasilkan dalam pelaksanaan Tesis ini dapat bermanfaat, Amin.

Gowa, 27 Desember 2023

Penulis



ABSTRAK

Dalam beberapa aplikasi keteknikan, jaringan syaraf buatan terbukti efisien dan efektif untuk tujuan modeling, estimasi, optimisasi, prediksi dan control. Khususnya untuk aplikasi pada sistem photovoltaik, beberapa model jaringan syaraf buatan telah digunakan untuk mengestimasi daya dan energi maksimum keluaran dari modul photovoltaik. Metode jaringan syaraf buatan dikarakterisasi dengan teknik komputasi sederhana, kapabilitas pengenalan pola yang baik dalam kaitan penyelesaian persoalan karakteristik tak linear dan variabilitas daya keluaran sistem photovoltaik. Meskipun demikian, masih terdapat kemungkinan adanya kelemahan dan kekurangan metode ini selama proses komputasi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menginvestigasi proses training dan validasi dari berbagai jenis jaringan syaraf buatan dalam kaitan dengan proses estimasi daya dan energi keluaran maksimum dari modul photovoltaik yang berbasis teknologi *crystalline Silicon*. Metode jaringan syaraf buatan yang telah dibuat adalah *radial basis function neural network (RBF)*, *adaptive neuro-fuzzy inference system neural network (ANFIS)* dan *three layered feed-forward neural network (TFFN)*. Penekanan pada jenis modul photovoltaik dengan teknologi yang berbasis kristal silikon dilakukan pada penelitian ini karena teknologi ini mendominasi pasar photovoltaik dewasa ini dengan efisiensi yang relatif tinggi dan biaya investasi yang relatif lebih murah dibandingkan dengan jenis teknologi yang lain. Oleh karena karakteristik listrik teknologi modul yang berbasis kristal silikon hampir sama, kita bisa memilih salah satu struktur jaringan syaraf buatan yang bisa merepresentasikan keseluruhan modul photovoltaik. Kriteria yang bisa dipilih adalah proses training, tingkat akurasi training dan validasi dan struktur jaringan. Untuk mencapai tujuan penelitian, model jaringan syaraf buatan di-*training* berdasarkan data-data karakteristik listrik daya maksimum untuk setiap jenis modul photovoltaik berdasarkan model matematik Sandia National Laboratory. Sedangkan validasi dilakukan untuk dua jenis kondisi cuaca, yaitu cerah dan berawan di mana masing-masing kondisi cuaca ini memberikan variasi intensitas cahaya matahari dan temperatur sel yang berbeda. Jenis modul photovoltaik yang berbasis teknologi kristal silikon yang akan diinvestigasi adalah *multi-crystalline Silicon based edge defined film-fed growth (EFG)* dan *wafer solar cell*, *mono-crystalline Silicon* dan teknologi *thin-film Silicon solar cell*. Sedangkan



stal silikon adalah *double junction amorphous Si (2j a-Si)*, *triple junction a-Si*, *Cadmium Indium Diselenide (CIS)* dan *thin film Cadmium Telluride*

ABSTRACT

In several engineering applications, artificial neural networks have proven efficient and effective for modeling, estimating, optimization, prediction, and control purposes. Especially for applications in photovoltaic systems, several models of artificial neural networks have been used to estimate the maximum power and energy output of photovoltaic modules. Artificial neural network methods are characterized by simple computational techniques, good pattern recognition capabilities in relation to problem solving nonlinear characteristics and variability of photovoltaic system output power. However, there are still possible weaknesses and shortcomings of this method during the computational process. Therefore, this study aims to develop and investigate the training and validation process of various types of artificial neural networks in relation to the process of estimating the maximum power and output energy of photovoltaic modules based on crystalline silicon technology. The artificial neural network methods that have been created are *radial basis function neural network (RBF)*, *adaptive neuro-fuzzy inference system neural network (ANFIS)* and *three-layered feed-forward neural network (TFFN)*. The emphasis on the type of photovoltaic module with crystalline silicon-based technology was carried out in this research because this technology dominates the photovoltaic market today with relatively high efficiency and relatively cheaper investment costs compared to other types of technology. Because the electrical characteristics of silicon crystal-based module technology are almost the same, we can choose one of the artificial neural network structures that can represent the entire photovoltaic module. The criteria that can be chosen are the training process, the level of accuracy of training and validation and the network structure. To achieve the research objectives, artificial neural network models were trained based on data on the characteristics of maximum power electricity for each type of photovoltaic module based on the mathematical model of Sandia National Laboratory. While validation is carried out for two types of weather conditions, namely sunny and cloudy where each of these weather conditions provides different variations in sunlight intensity and cell temperature. The types of photovoltaic modules based on Silicon crystal technology to be investigated are *multi-crystalline silicon based edge defined film-fed growth (EFG)* and *wafer solar cell, mono-crystalline silicon* and *thin-film Silicon solar cell* technology. While silicon non-crystalline *ble junction amorphous Si (2j a-Si)*, *triple junction amorphous Si (3j a-Si)*, *Diselenide (CIS)* and *thin film Cadmium Telluride (CdTe)*.



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS	3
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	4
KATA PENGANTAR	5
ABSTRAK.....	6
ABSTRACT.....	7
DAFTAR ISI.....	8
DAFTAR GAMBAR.....	10
DAFTAR LAMPIRAN.....	11
BAB I. PENDAHULUAN	12
I. 1. Latar Belakang	12
I. 2. Rumusan Masalah.....	14
I. 3. Tujuan Penelitian.....	16
I. 4. Metode Penelitian	16
I. 5. Manfaat Penelitian.....	17
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	18
II. 1. Pemodelan matematik modul photovoltaik	18
II. 2. Pemodelan Jaringan Syaraf Buatan	23
II. 2. 1. Radial Basis Function (RBF).....	23
II. 2. 2. Three Layered Feed-Forward Neural Network (TFFN)	24
II. 2. 3. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)	26
II. 3. Tinjauan Sel Surya berbasis non-kristal Silikon	28
BAB III. METODE PENELITIAN	33
III. 1. Alur pikir penelitian	33
III. 2. Metode analisis	36
BAB IV. HASIL PENELITIAN.....	38
IV. 1. Radial Basis Function Neural Network (RBF).....	38
IV. 2. Three Layered feed-forward Neural Network (TFFN)	41
IV. 3. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS).....	46
IV. 4. Validasi JST pada Teknologi non-kristal silikon.....	50
Tentang mengenai manfaat hasil penelitian	55
DAFTAR PUSTAKA.....	57
LAMPIRAN.....	58



DAFTAR TABEL

Table 1. Variabel untuk model PV modul 1	18
Table 2. Spesifikasi data PV modul berdasarkan sandia National laboratory (SNL).....	20
Table 3. Spesifikasi PV modul kristal silikon dengan STC: A.M=1.5; 1000W/m ² dan 25°C	21
Table 4. Spesifikasi panel surya berbasis non-kristal silikon.....	31
Table 5. Hidden nodes dan SSE dengan metode RBF.....	40
Table 6. Error pada proses validasi RBF.....	41
Table 7. Parameter pada proses training TFFN	44
Table 8. Nilai SSE dengan TFFN untuk validasi cuaca yang berbeda	46
Table 9. Hasil proses training dengan metode ANFIS	49
Table 10. Hasil proses validasi dengan metode ANFIS	50
Table 11. Kesimpulan umum hasil penelitian pada panel surya berbasis kristal silikon	50
Table 12. Hasil proses training JST	52
Table 13. Indeks kinerja selama proses validasi	54
Table 14. Indeks kinerja model JST.....	54



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Karakteristik listrik $V_{MPP}=f(E, T_c)$ untuk jenis modul photovoltaik kristal silikon.....	22
Gambar 2. Struktur dasar jaringan RBF.....	23
Gambar 3. Struktur jaringan TFFN.....	25
Gambar 4. Struktur dasar jaringan ANFIS.....	26
Gambar 5. Tegangan pada titik maksimum (V_{MPP}), irradiance: (100-1000W/m ²) dan temperatur sel: (10-60°C).....	31
Gambar 6. Alur pikir pelaksanaan penelitian.....	33
Gambar 7. Profil irradiance (E) dan temperatur sel (T_c) pada kondisi cuaca cerah dan berawan.....	34
Gambar 8. Alur proses training dengan jaringan TFFN.....	35
Gambar 9. Struktur TFFN.....	46
Gambar 10. Hasil validasi untuk sinyal ramp dan random pada pengujian sel surya.....	55



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil proses training RBF untuk masing-masing modul.....	62
Lampiran 2. Struktur RBF yang optimal untuk setiap jenis modul	66
Lampiran 3. Matriks weight W_1 , W_2 dan bias b_1 , b_2 untuk struktur RBF masing-masing modul.....	70
Lampiran 4. Grafik hasil validasi untuk setiap jenis modul dengan metode RBF.....	71
Lampiran 5. Training error dan learning rate TFFN untuk masing-masing modul.....	75
Lampiran 6. Tipikal grafik selama proses training pada masing-masing modul	78
Lampiran 7. Matriks weight W_1 , W_2 dan bias b_1 , b_2 pada jaringan TFFN.....	80
Lampiran 8. Hasil validasi daya maksimum untuk masing-masing modul dengan metode TFFN	82
Lampiran 9. Hasil training dan validasi dengan metode ANFIS.....	86



BAB I. PENDAHULUAN

I. 1. Latar Belakang

Indonesia sebagai salah satu negara yang terletak di garis khatulistiwa tentunya memiliki potensi energi matahari yang sangat besar. Hal ini disebabkan karena pergeseran sudut datang cahaya matahari setiap tahunnya tidak bergeser terlalu jauh dibandingkan dengan negara-negara yang terletak jauh di bagian utara dan selatan khatulistiwa. Untuk wilayah Sulawesi Selatan saja intensitas solar radiasi perhari rata-rata sekitar $5,5\text{kWh/m}^2$. Artinya dengan data intensitas cahaya matahari yang ada, kita bisa memperoleh energi sebesar 5,5 kWh dalam setiap luasan 1 meter persegi dalam sehari. Jadi bisa dibayangkan betapa besarnya energi matahari yang kita terima setiap hari jika ruang lingkup area instalasi yang lebih luas [Syafaruddin, 2012]. Meskipun demikian, kita belum mampu mengutilisasi secara maksimal daya dan energi keluaran untuk keperluan energi listrik.

Di antara semua jenis pembangkit tenaga listrik yang berbasis energi terbarukan, sistem photovoltaik mempunyai potensi yang sangat menjanjikan dalam hal sumber energi dan material pendukung teknologi solar sel. Selama matahari bersinar dan cahayanya sampai ke permukaan bumi maka kita akan selalu mempunyai sumber energi untuk sistem photovoltaik. Berdasarkan informasi yang diperoleh dari Solon, Inc., salah satu perusahaan pembuat solar sel terkemuka di dunia bahwa setiap harinya permukaan bumi menerima 970 milyar kWh energi matahari. Jumlah ini sangat luar biasa besarnya karena kalau kita mengasumsikan sebagai baterai yang jatuh dari langit ke bumi maka seolah-olah seperti hujan baterai yang hebat. Kalau kita melihat dari segi material pendukung teknologi solar sel tentunya kita sangat bergantung pada material silikon. Material ini pada dasarnya tersedia melimpah di permukaan bumi karena terdapat dalam senyawa pasir (SiO_2). Hanya saja pemisahan silikon ingot dari senyawanya membutuhkan proses metalurgi yang kompleks dan membutuhkan jumlah energi yang sangat besar. Pengembangan teknologi nano-material dan bahan semikonduktor merupakan salah satu tantangan terbesar dalam memacu perkembangan teknologi solar sel.

Oleh karena perhatian global tertuju pada utilisasi energi matahari untuk penyediaan energi masa depan, perkembangan sistem photovoltaik mencapai peningkatan lebih dari 30% dalam satu dekade terakhir. Kita bisa melihat aplikasi sistem photovoltaik mulai dari sistem tenaga surya hingga instalasi sistem yang sangat besar seperti sistem grid kelistrikan yang ada. Beberapa hal yang memicu trend positif ini adalah listrik tenaga surya bersih tanpa emisi, tidak menggunakan cairan, tidak ribut



karena tidak ada bagian yang berputar dan mempunyai dampak visualisasi yang rendah karena instalasi khususnya pada rumah tangga biasa pada bagian atap sehingga tersembunyi dari penglihatan orang lain. Di samping itu biaya dan waktu pemeliharaan relatif rendah dan instalasi sistem bisa bertahan hingga 25 tahun. Juga penambahan kapasitas mudah dilakukan karena hanya menghubungkan secara seri dan parallel maka kita bisa mengobservasi daya keluaran sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan. Berkaitan dengan kepentingan sistem tenaga listrik secara umum maka instalasi pembangkit listrik tenaga surya yang biasa dilakukan sangat dekat dengan pusat-pusat beban maka akan mengurangi rugi transmisi dan distribusi karena transportasi daya tidak perlu lagi dilakukan.

Hal yang paling sering diperdebatkan dengan keberadaan teknologi pembangkit listrik tenaga surya yaitu daya keluaran yang sangat fluktuatif dan sangat bergantung pada kondisi lingkungan sekitar. Lebih sulit lagi karena daya keluaran selalu berpindah setiap saat kondisi input berubah. Hal ini menyebabkan kita tidak mampu mengoptimalkan daya keluaran sistem photovoltaik meskipun sistem kontrol bisa diterapkan dalam melacak titik maksimum ini. Perubahan ini bisa dilihat pada saat intensitas cahaya matahari meningkat maka daya keluaran juga akan meningkat tetapi disaat yang bersamaan temperatur sel juga kemungkinan naik yang menyebabkan daya keluaran akan turun secara signifikan. Fenomena menjadi sangat signifikan pada jenis modul yang berbasis teknologi silikon kristal karena mempunyai koefisien temperature terhadap tegangan yang negatif. Beberapa cara dilakukan untuk melacak titik maksimum secara efektif mulai dari yang sifatnya konvensional yang berbasis komputasi numerik dan statistik hingga metode yang berbasis kecerdasan buatan.

Salah satu metode yang berbasis kecerdasan buatan adalah jaringan syaraf buatan atau artificial neural network. Jaringan syaraf buatan telah menjadi pilihan menarik dalam menyelesaikan persoalan estimasi dan optimisasi dalam bidang keteknikan. Kelebihan dari metode ini dibandingkan dengan metode komputasi konvensional adalah teknik komputasi yang sederhana dan mempunyai kemampuan pengenalan pola yang baik (Mellit & Kalogirou, 2008; Mellit, et.al, 2009). Dengan menggunakan metode jaringan syaraf buatan, kita tidak membutuhkan lagi pengetahuan internal suatu sistem, proses komputasi yang terbilang ringan dan bisa dipergunakan untuk menyelesaikan persoalan yang outputnya bersifat *multi-objective* (Giraud & Salameh, 1999). Dalam beberapa kasus, hanya dibutuhkan proses training data untuk



si yang optimum tanpa menyelesaikan persamaan matematik tak-linear atau si-asumsi statistik seperti halnya dengan metode optimisasi yang lazim t, et.al, 2006). Oleh karena itu, jaringan syaraf buatan terbukti sesuai

digunakan untuk pemodelan sistem, proses identifikasi, optimisasi, prediksi, peramalan dan kontrol suatu sistem yang kompleks.

Dengan pemahaman di atas, jaringan syaraf buatan tentunya bisa dipergunakan untuk proses optimisasi sistem photovoltaik. Hal ini disebabkan karena karakteristik alami yang dimiliki oleh sistem photovoltaik yang tak-linear. Pencarian titik optimum dari sistem photovoltaik dengan karakteristik tak-linear menggunakan teknik optimisasi konvensional atau metode numerik lainnya pasti membutuhkan teknik komputasi yang sangat khusus, proses pencarian yang membutuhkan waktu dan kemungkinan sulit mencapai solusi konvergensi dalam situasi tertentu. Selain itu, karakteristik output sistem photovoltaik sangat fluktuatif karena dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Daya keluarannya sangat dipengaruhi oleh level intensitas cahaya matahari dan temperatur sekitar dimana kedua faktor ini mengikuti karakteristik alami dari photocurrent photovoltaik (Sun, et.al, 2002). Oleh karena itu, pelacakan titik operasi maksimum diperlukan untuk mencapai rating efisiensi konversi sistem photovoltaik. Dalam beberapa teknik kontroler yang dipergunakan untuk melacak titik maksimum ini (Syafaruddin, et.al 2009 (2 papers); de Medeiros Torres, et.al, 1998), daya optimum sering dipergunakan sebagai target kontroler sehingga hal ini menjadi menarik untuk diselidiki. Akan tetapi, tegangan operasi modul photovoltaik sangat dipengaruhi oleh temperatur. Jika temperatur naik, maka tegangan operasi akan turun, demikian sebaliknya. Kondisi ini lebih buruk lagi ketika langit berawan sehingga intensitas cahaya matahari menjadi tidak merata, sehingga tegangan optimum mungkin akan bergeser turun sangat jauh dari titik optimum global. Oleh karena itu, daya maksimum tidak bisa dilinearisasi sebagai fungsi intensitas cahaya matahari dan temperatur sel. Untuk mengatasi permasalahan ini, jaringan syaraf buatan menjadi pilihan menarik dalam mengidentifikasi titik-titik optimum dalam semua skenario operasi sistem.

I. 2. Rumusan Masalah

Meskipun sistem photovoltaik menarik perhatian lebih dibandingkan dengan jenis pembangkitan listrik yang berbasis energi terbarukan yang lain, masih terdapat sejumlah tantangan yang besar untuk lebih memaksimalkan kapasitas sistem. Selain daya keluaran optimal selalu bervariasi di mana bergantung pada kondisi lingkungan, kita juga masih menghadapi tantangan lain seperti kualitas material modul dan enkapsulasi. Biaya modul yang tinggi ini disebabkan oleh teknologi yang kompleks pada saat pemisahan, pemotongan dan pengaturan unsur silikon pada sel solar. Persoalan ini bisa diatasi dengan perkembangan jenis teknologi



solar sel yang baru misalnya yang berbasis thin-film dan tandem junction solar sel. Persoalan yang lain yaitu kita masih membutuhkan unit pengatur daya misalnya inverter dan baterai untuk menyesuaikan daya keluaran sel sesuai dengan kebutuhan beban listrik. Persoalan ini kemudian di atasi dengan pengembangan teknologi elektronika daya dengan target efisiensi yang tinggi dan stabilitas desain inverter.

Tantangan yang lain adalah karakteristik solar sel yang non-linear dengan output random dan dinamik membuat pelacakan titik maksimum menjadi sangat sulit. Persoalan ini menjadi lebih kompleks dengan adanya diversifikasi teknologi yang berbasis kristal dan non-kristal silikon. Semua tantangan yang dikemukakan di sini bermuara pada efisiensi sistem yang rendah. Untuk teknologi yang berbasis silikon, efisiensi berkisar 10 – 15 %, sedangkan jenis teknologi non-kristal mempunyai efisiensi lebih rendah lagi. Hal ini belum lagi dengan pertimbangan biaya yang relative lebih rendah dibandingkan dengan jenis pembangkit yang lain. Oleh karena itu pengoperasian pada titik maksimum menjadi hal yang sangat penting. Pada penelitian ini, prediksi dan estimasi daya dan energi keluaran maksimum photovoltaik dilakukan dengan menggunakan jaringan syaraf buatan.

Metode jaringan syaraf buatan telah intensif digunakan untuk melacak titik maksimum suatu sistem photovoltaik. Tipe *three layered feed-forward neural network* (TFFN) sangat sederhana digunakan untuk mengoptimasi duty ratio dari buck-boost DC-DC converter berdasarkan input signal berkaitan dengan kondisi lingkungan (Narri & Mummadi, 1999; Jae-Sub, et.al, 2008). Akan tetapi, struktur *multi layer perceptron* (MLP) ini kadang-kadang terkendala oleh proses komputasi yang lambat selama proses training. Meskipun pada kenyataannya, struktur TFFN merupakan struktur yang paling populer diantara semua struktur jaringan syaraf buatan yang dipergunakan untuk proses optimisasi sistem photovoltaik. Untuk memaksimalkan kinerja struktur TFFN berkaitan dengan pencapaian level konvergensi selama proses training maka pemilihan data untuk proses training merupakan hal yang penting. Sedangkan metode *radial basis function* (RBF) dipergunakan untuk acuan kontroler pada aplikasi pelacakan titik maksimum (Cao, et.al, 2008). Kombinasi dengan regulator neuro-fuzzy, struktur RBF mampu meningkatkan efisiensi keluaran sistem photovoltaik (Varnham, et.al, 2007). Dalam hal struktur adaptive neuro-fuzzy inference system, kelihatannya sangat jarang dipergunakan untuk proses optimisasi pada aplikasi sistem photovoltaik, kecuali satu penelitian



lakukan proses training terhadap semua komponen sistem photovoltaik dalam im sekitar (Mellit & Kalogirou, 2006). Dalam hal pemodelan dan simulasi likon, jaringan syaraf buatan telah dianggap teknologi yang mapan (Villalva, 2007). Faktanya di atas menunjukkan bahwa metode jaringan syaraf buatan masih

cukup menarik dikembangkan untuk proses optimisasi sistem photovoltaik terutama dalam hal investigasi mengenai proses training, struktur jaringan dan tingkat akurasi selama proses training dan validasi.

I. 3. Tujuan Penelitian

Perkembangan teknologi modul photovoltaik sangat cepat dengan target tingginya penetrasi instalasi sistem yang berbasis energi matahari dan peningkatan efisiensi operasi sistem photovoltaik. Sejalan dengan ketersediaan bahan dasar silikon di permukaan bumi yang melimpah, teknologi yang berbasis kristal silikon menjadi dominan dibandingkan jenis teknologi modul yang berbasis non-kristal silikon. Selain itu alasan efisiensi energi konversi yang tinggi dan biaya yang relatif murah membuat teknologi yang berbasis silikon ini bisa dianggap sangat mapan dalam hal implementasi, sehingga dengan mudah kita bisa memperoleh beberapa jenis ini dipasaran.

Tujuan dari penelitian ini adalah mendesain dan mengembangkan tiga jenis jaringan syaraf buatan yaitu Radial Basis Function (RBF), Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) dan Three Layered Feed-Forward Neural Network (TFFN) untuk estimasi titik maksimum jenis modul photovoltaik yang berbasis teknologi kristal silikon. Dalam penelitian ini kita mengambil beberapa jenis modul photovoltaik misalnya ASE-50-ATF/17 (EFG mc-Si), Kyocera KC-80 (wafer mc-Si), BP Solar BP-585 (c-Si) dan AstroPower AP-8225 (thin film Si). Investigasi ini penting selain untuk diversifikasi metode yang berbasis kecerdasan buatan, kita bisa merekomendasikan salah jenis struktur jaringan syaraf buatan untuk aplikasi yang dimaksud berdasarkan pertimbangan kesederhanaan struktur, fleksibilitas proses training dan tingkat akurasi selama proses training dan validasi. Hal ini memungkinkan kita lakukan karena karakteristik listrik dari jenis modul photovoltaik yang berbasis kristal silikon pada dasarnya sama. Selain itu, Metode jaringan syaraf buatan yang dikembangkan bisa menjadi bagian integrasi penelitian yang lain terutama untuk aplikasi yang berbasis pengukuran estimasi, prediksi dan kontrol.

I. 4. Metode Penelitian



nelitian yang dilakukan mengikuti prinsip desain jaringan syaraf buatan yaitu
1 training, proses training dan proses validasi. Pengumpulan data training
1 mengimplementasikan model matematik yang direkomendasikan oleh
laboratory. Pada model ini, kita bisa mendapatkan kombinasi daya maksimum

yang sebagai fungsi intensitas cahaya matahari dan temperature sel. Daya maksimum ini nantinya sebagai target dalam proses training. Berikutnya dengan kombinasi data yang ada kita melakukan proses training. Proses training ini tujuannya untuk adalah untuk menentukan struktur jaringan yang ditandai dengan jumlah hidden nodes. Jumlah hidden nodes yang sedikit menunjukkan kesederhanaan jaringan. Setelah itu kita melakukan proses validasi terhadap jaringan yang telah dikonfirmasi dengan training error yang terendah. Tentunya data yang digunakan untuk validasi berbeda dengan data yang dipakai untuk validasi. Untuk tujuan ini, data untuk validasi diambil dari dua kondisi cuaca yang berbeda yaitu kondisi cuaca cerah dan berawan. Tingkat akurasi selama proses validasi dilakukan dengan menggunakan indikator *sum of square error* (SSE). Semakin rendah nilai SSE berarti performance jaringan yang telah didesain sangat akurat dan siap untuk ditest dengan kondisi input cuaca apa saja. Tahapan-tahapan yang dijelaskan disini berlaku untuk pengembangan semua jaringan syaraf buatan yang menjadi target penelitian.

I. 5. Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat penelitian ini bisa dijelaskan secara garis besar berkaitan dengan koordinasi operasi dengan jenis pembangkit dan komponen-komponen lain yang terdapat dalam sistem tenaga. Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa daya dan energi output sistem photovoltaik terkadang tidak bisa diprediksi secara akurat karena perubahan kondisi lingkungan yang tidak dapat diprediksi dengan baik, sementara prediksi harian, bulanan dan tahunan untuk keluaran sistem photovoltaik menjadi penting sebagai bagian perencanaan dan operasi keseluruhan sistem daya. Untuk sistem stand-alone dan sistem hybrid, hasil estimasi daya dan energi output sangat berguna untuk optimisasi kinerja komponen lain misalnya baterai, inverter dan charger controller. Ditambahkan lagi, dengan kemampuan menentukan penjadwalan unit pembangkit yang lain untuk sistem hibrid maka keandalan suplai listrik dan pengurangan biaya investasi bisa tercapai.



BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

II. 1. Pemodelan matematik modul photovoltaik

Seperti yang telah disebutkan di atas, pemodelan modul photovoltaik berdasarkan pada model yang dikembangkan oleh Sandia national Laboratory (SNL), USA. Model ini sangat efektif mengkarakterisasi kinerja modul dalam berbagai kondisi operasi dan lingkungan yang berbeda. Model ini membutuhkan parameter input yang detail terhadap respon PV modul terhadap intensitas cahaya matahari, temperatur sel, sudut datang cahaya matahari dan massa udara. Model ini juga bisa digunakan untuk menentukan titik-titik penting dari kurva I-V misalnya arus short-circuit, tegangan open-circuit dan titik operasi maksimum (Karatepe, et.al, 2006). Model ini dikembangkan berdasarkan fungsi empirik beberapa PV modul yang telah banyak dikomersialkan. Dengan pertimbangan hal-hal di atas, kita bisa mendefinisikan beberapa variabel yang tertera pada Tabel 1 untuk dipakai meng-generate kurva I-V:

Table 1. Variabel untuk model PV modul 1

E	Level intensitas cahaya matahari pada permukaan modul, W/m^2
E_e	Nilai efektif intensitas cahaya matahari 'Suns'
AM_a	Absolute air mass \rightarrow Massa udara mutlak (dimensionless)
AOI	Angle of incident \rightarrow sudut datang cahaya matahari (derajat)
T_c, T_o	Temperatur sel dan referensi (derajat Celsius)
I_{sco}, I_{mpo}	Arus circuit current dan arus pada titik maksimum pada <i>STC</i>
V_{oco}, V_{mpo}	Tegangan open circuit voltage dan tegangan pada titik maksimum pada <i>STC</i>
$\alpha_{isc}, \alpha_{mp}, \beta_{Voco}, \beta_{Vmpo}$	Koefisien temperatur yang dinormalisasi
C_0-C_3	Koefisien yang ditentukan secara empirik
N_s	Jumlah sel yang terhubung seri
<i>STC</i>	$E=1000 W/m^2, T_c=25^\circ C, AM_a = 1.5, AOI = 0^\circ$



engasumsi fungsi massa udara absolute, (AM_a) sama dengan 1.0 kemudian n komponen-komponen beam dan diffuse dari intensitas cahaya matahari ke tunggal, maka arus short-circuit bisa dihitung sebagai berikut:

$$I_{sc} = I_{sco} \left(\frac{E}{E_o} \right) (1 + \alpha_{Isc} (T_c - T_o)) \quad (1)$$

Sedangkan parameter listrik yang lain, misalnya arus pada titik maksimum (I_{mp}), tegangan open-circuit (V_{oc}) dan tegangan pada titik maksimum (V_{mp}) bisa dihitung dengan menggunakan pers. (2)-(4):

$$I_{mp} = I_{mpo} (C_0 E_e + C_1 E_e^2) (1 + \alpha_{Imp} (T_c - T_o)) \quad (2)$$

$$V_{oc} = V_{oco} + N_s \delta(T_c) \ln(E_e) + \beta_{Voco} E_e (T_c - T_o) \quad (3)$$

$$V_{mp} = V_{mpo} + C_2 N_s \delta(T_c) \ln(E_e) + C_3 N_s (\delta(T_c) \ln(E_e))^2 + \beta_{Vmpo} E_e (T_c - T_o) \quad (4)$$

Dalam model ini, konsep intensitas cahaya efektif (E_e) digunakan karena kenyataannya bahwa modul photovoltaik tidak bisa merespon semua panjang gelombang cahaya matahari yang tertera dalam spektrum energi. Intensitas cahaya efektif bisa diperoleh dengan menggunakan pers. (5):

$$E_e = \frac{I_{sc}}{I_{sco} (1 + \alpha_{Isc} (T_c - T_o))} \quad (5)$$

Sedangkan, tegangan termal per sel $\delta(T_c)$ dalam pers. (3) dan (4) dihitung dengan:

$$\delta(T_c) = \frac{nk(T_c + 275.15)}{q} \quad (6)$$

Dengan n adalah faktor idealiti diode pada sel surya, k adalah konstanta Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K) dan q adalah muatan listrik ($1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb).

Data untuk masing-masing modul yang dipakai dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 2.



Table 2. Spesifikasi data PV modul berdasarkan sandia National laboratory (SNL)

Spesifikasi modul photovoltaik	ASE-50	KC-80	BP-585	AP-8225
Jenis material	EFG mc-Si	Wafer mc-Si	c-Si	thin film Si
Vintage	1999(E)	1999(E)	2000(E)	1997
Area (m ²)	0.435	0.636	0.63	0.974
Number of cells in series, N_s	36	36	36	36
Short circuit current at STC, I_{sc} (A)	3.2	4.97	5	5.737
Open circuit voltage at STC, V_{oc} (V)	21.1	21.5	22	19.87
Current at maximum-power point at STC, I_{mp} (A)	2.9	4.73	4.7	5.18
Voltage at maximum-power point at STC, V_{mp} (V)	17.2	16.9	18	15.34
Normalized temperature coefficient for short circuit current, α_{sc} (°C ⁻¹)	0.00078	0.00044	0.00008	0.00076
Normalized temperature coefficient for current at maximum power-point, α_{mp} (°C ⁻¹)	0.0001	-0.00061	-0.0005	0.00004
Temperature coefficient at 1000W/m ² for open circuit voltage, $\beta_{V_{oc}}$ (V/°C)	-0.076	-0.089	-0.094	-0.092
Temperature coefficient at 1000W/m ² for voltage at maximum-power point, $\beta_{V_{mp}}$ (V/°C)	-0.079	-0.091	-0.095	-0.089
Diode factor of solar cell, n	1.29	1.36	1.38	1.6
Empirical coefficient relation between current at maximum-power point and irradiance, C_0	0.997	1.01	0.991	0.952
Empirical coefficient relating open circuit voltage to irradiance, C_1	0.003	-0.01	0.009	0.048
Empirical coefficient relating voltage at maximum-power point to irradiance, C_2	0.208062	0.02894	0.091575	0.090503
Empirical coefficient relating voltage at maximum-power point to irradiance, C_3 (V ⁻¹)	-8.60848	-5.9791	-8.79359	-7.54082

Spesifikasi kelistrikan untuk semua jenis modul yang disebutkan di atas untuk standard test condition (STC: intensitas cahaya matahari 1000 W/m² dan sel temperatur 25°C) dapat dilihat dalam Tabel 3.



Table 3. Spesifikasi PV modul kristal silikon dengan STC: A.M=1.5; 1000W/m² dan 25°C

Modul photovoltaik	Jenis Teknologi	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	I _{MPP} (A)	V _{MPP} (V)	P _{MPP} (W)
ASE-50	EFG mc-Si	3.2	21.1	2.9	17.2	50
KC-80	Wafer mc-Si	4.97	21.5	4.73	16.9	80
BP-585	c-Si	5.0	22.0	4.7	18.0	85
AP-8225	thin film Si	5.737	19.87	5.18	15.34	79.5

Keterangan:

I_{sc}= Arus short circuit

V_{oc} = Tegangan open circuit

I_{MPP}= Arus pada titik maksimum

V_{MPP}= Tegangan pada titik maksimum

P_{MPP}= Daya maksimum

Jenis-jenis modul ASE-50-ATF/17 (50) dan Kyocera KC-80 adalah jenis modul dengan menggunakan teknologi multi-kristal silikon. Untuk jenis modul yang pertama dibentuk teknologi oktagon berbasis *edge defined film-fed growth* (EFG) sehingga jumlah material yang digunakan serta energi yang dikonsumsi pada saat pembuatan modul menjadi sedikit. Sedangkan untuk jenis modul yang kedua berbasis Silicon wafer dan merupakan salah satu inovasi terkini dari Kyocera tentang pengembangan sel photovoltaik sehingga dihasilkan modul photovoltaik dengan efisiensi yang tinggi. Kedua teknologi yang disebutkan disini pada dasarnya dienkapsulasi dengan pelindung penutup dari gelas yang dipanasi kemudian diperkuat dengan bingkai Aluminium yang di-anodisasi untuk mendapatkan kekuatan struktur modul dan proteksi yang maksimum terhadap perubahan cuaca yang ekstrim. Dibandingkan dengan kedua jenis modul ini, BP Solar BP-585 merupakan teknologi mono-kristal silikon dan cocok untuk aplikasi yang membutuhkan energi maksimum dalam area yang terbatas. Sedangkan AstroPower AP-8225 adalah teknologi thin film yang dibentuk dari beberapa sel multi-kristal yang terhubung seri. Kelebihan dari jenis modul yang berbasis thin film yaitu bisa mengurangi biaya produksi yang menggunakan teknologi multi dan mono-kristal karena bentuk lembaran



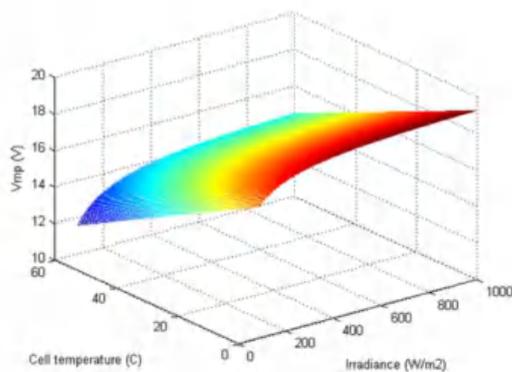
...on dengan proses substraksi dengan biaya rendah.

...a kelistrikan dari jenis modul yang dipilih pada penelitian ini berdasarkan

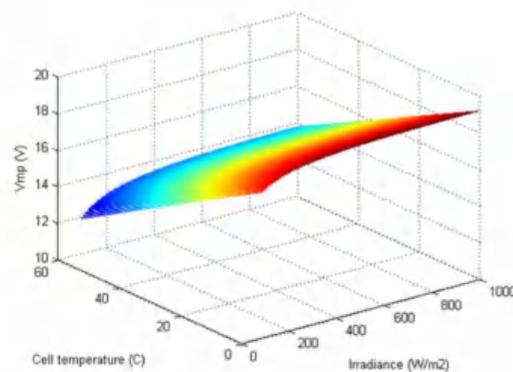
...h dari Sandia National laboratory, Amerika Serikat (D.L. King, 1997, 2000).

...ik V_{MPP} sebagai fungsi intensitas cahaya matahari dan temperatur sel

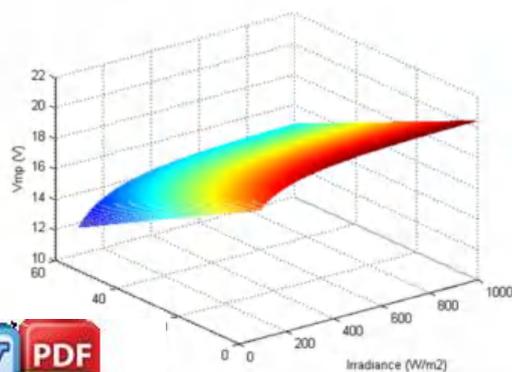
ditampilkan pada Gambar 1. Model yang dikembangkan sangat sesuai dengan karakteristik sejumlah modul photovoltaik yang telah dikomersialisasi sekarang ini. Karakterisasi teknologi modul photovoltaik yang berbahan dasar kristal silikon dijelaskan sebagai berikut. Arus *short-circuit* bergantung secara linear dengan intensitas cahaya matahari, sedangkan tegangan *open-circuit* bergantung secara logaritmik. Sedangkan variasi terhadap temperatur, arus *short-circuit* meningkat sedikit karena mobilitas partikel dalam bahan semikonduktor yang dipicu oleh banyaknya jumlah photon yang diserap material, tetapi terjadi penurunan tegangan *open-circuit* yang signifikan karena adanya faktor koefisien tegangan-temperatur yang negatif yang mengikuti nilai faktor diode. Dampak dari peningkatan temperatur ini pada kinerja modul di mana daya keluaran modul akan berkurang secara drastis. Oleh karena perbedaan karakteristik yang unik antara satu jenis modul dengan modul lainnya, maka dibutuhkan desain jaringan syaraf buatan yang khusus jika ingin menggunakan sebagai sistem pelacak titik maksimum. Penilaian yang bisa diambil dalam penentuan model jaringan syaraf buatan yang sesuai adalah tingkat akurasi, fleksibilitas training proses dan kesederhanaan struktur jaringan.



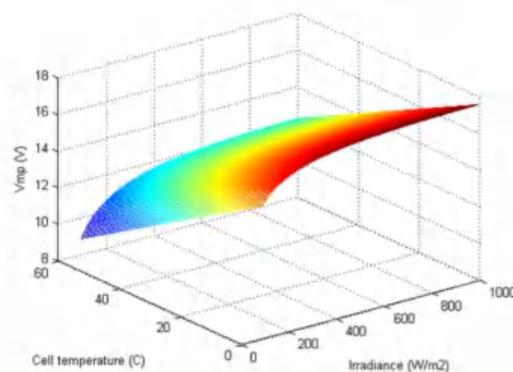
a. ASE-50-ATF/17 (EFG mc-Si)



b. Kyocera KC-80 (Wafer mc-Si)



c. BP Solar BP-585 (c-Si)



d. AstroPower AP-8225 (Thin film Si)

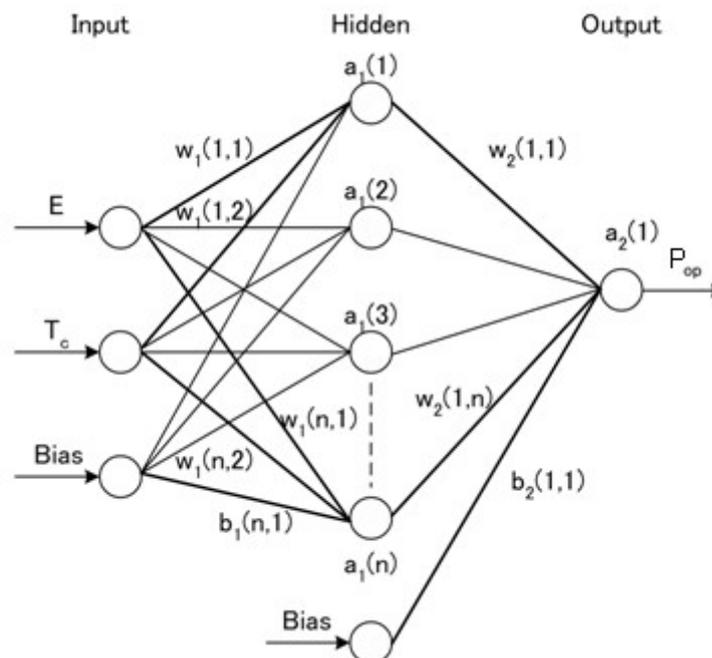


teristik listrik $V_{MPP}=f(E, T_c)$ untuk jenis modul photovoltaik kristal silikon

II. 2. Pemodelan Jaringan Syaraf Buatan

II. 2. 1. Radial Basis Function (RBF)

Radial basis function (RBF) dan three layered feed-forward Neural Network (TFFN) pada dasarnya mempunyai struktur yang sama karena merupakan kelompok multi layer perceptron (MLP) [A. Mellit, 2005]. Struktur ini dinyatakan pada Gambar 2. Perbedaannya terletak pada pola mapping data; di mana RBF menggunakan *local mapping* sedangkan TFFN menggunakan *global mapping*. Artinya dengan metode RBF, hanya input yang dekat dengan *receptive field* yang diproses melalui fungsi aktivasi. Hidden layer yang diperoleh merupakan neuron pada pusat *receptive field*, sedangkan *receptive field* itu sendiri terletak dalam *input space* di mana vektor input itu berada. Jika input vektor terletak dekat ke receptive field, maka hidden layer akan diaktifasi. Proses training dengan menggunakan jaringan RBF sangat sederhana. Sekali kita mencapai target error, proses training berhenti dan jumlah hidden nodes akan dikonfirmasi.



Gambar 2. Struktur dasar jaringan RBF

Struktur jaringan RBF berbeda dengan struktur Three Layered Feed-Forward Neural Network (TFFN) dan Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), terutama dalam hal transfer antara input dan hidden layer. Untuk jaringan RBF, Input signal, $[E, T_c]$ diolah dahulu dengan *distance Eucledan function*, 'dist', termasuk weights w_1 dan hasilnya menjadi input dari fungsi transfer radial basis, 'radbas'. Hasil proses ini digunakan pada hidden nodes a_1 . Secara matematik, algoritma jaringan syaraf



buatan yang berbasis RBF dinyatakan sebagai berikut:

$$a_1(n) = \text{radbas}[\text{dist}(w_1(n,1)E + w_1(n,2)T_c) b_1(n,1)] \quad (7)$$

dengan n adalah jumlah hidden nodes.

Setelah melalui proses ini, keluaran layer kedua a_2 yang merupakan hasil estimasi jaringan syaraf RBF secara sederhana diperoleh melalui proses fungsi transfer “purelin” antara output layer a_1 dengan weights w_2 , termasuk bias b_2 pada layer kedua. Besarnya pembobotan (weights) pada jaringan ini biasanya diselesaikan dengan menggunakan metode algoritma kuadrat terkecil (least square algorithm) dibandingkan dengan menggunakan metode back propagation [F. Giraud & Z.M. Salameh, 1999]. Perumusan matematis untuk kondisi di atas dinyatakan dengan:

$$a_2(m) = \text{purelin}\left[\sum_{n=1}^n w_2(m,n) a_1(n) + b_2(1,1)\right] \quad (8)$$

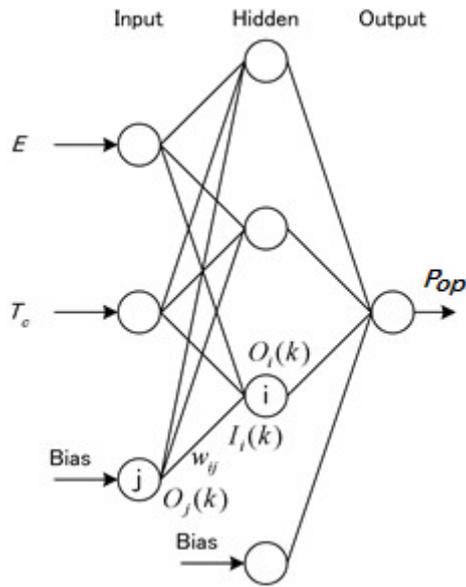
dengan m adalah jumlah node pada layer output.

Selama proses training, vektor input yang menyebabkan penurunan error jaringan, kemudian digunakan untuk meng-update hidden neuron yang baru. Jika error yang diperoleh setelah neuron baru ditambahkan cukup rendah atau dekat dengan error goal, maka proses training akan berhenti.

II. 2. 2. Three Layered Feed-Forward Neural Network (TFFN)

Jenis jaringan syaraf buatan Three Layered Feed-Forward Neural Network (TFFN) menggunakan algoritma *back propagation* dan metode *descent gradient* untuk mengatur weight dalam usaha menurunkan learning error (Hyun-Soo, et.al, 2008). Sekilas, struktur TFFN pada Gambar 3 hampir sama dengan struktur RBF, tetapi keduanya mempunyai algoritma yang berbeda. Algoritma TFFN mempropagasi error antara output aktual dan output yang diestimasi. Untuk alur maju (forward pass), semua vektor input, output aktual dan error dihitung; sedangkan untuk alur mundur, gradient error terhadap weight dihitung dengan mempropagasi error balik melalui keseluruhan struktur. Setiap kali gradient error dihitung, maka weight di-adjust. Konsekuensi dari pendekatan ini bahwa kita tidak akan pernah memperoleh nilai weight yang sama setiap kali proses training diulang. Oleh karena itu, kemungkinan memilih struktur yang sederhana sangat tinggi. Pemilihan struktur yang terbaik ini membutuhkan pemikiran kreatif jaringan. Pada umumnya untuk struktur TFFN, kita mengutilisasi fungsi arena feature differensiasi fungsi sigmoid yang sangat unik.





Gambar 3. Struktur jaringan TFFN

Pada penelitian ini, hubungan antara input dan output pada jaringan syaraf buatan yang berbasis TFFN dijelaskan berikut. Fungsi transfer sigmoid diutilisasi pada karakteristik node input-output. Untuk setiap node i pada hidden dan ouput layer, mempunyai signal keluaran $O_i(k)$ mengikuti persamaan berikut:

$$O_i(k) = \frac{1}{1 + e^{-I_i(k)}} \quad (9)$$

Bagian $I_i(k)$ pada persamaan di atas adalah signal input pada node i untuk setiap sampling ke- k . Input $I_i(k)$ ini diberikan melalui penjumlahan semua weights dengan output node j , $O_j(k)$:

$$I_i(k) = \sum_j w_{ij}(k) O_j(k) \quad (10)$$

dengan w_{ij} adalah weight yang terdapat antara node j dengan i .

Selama proses training, weights w_{ij} ini di-tuned secara berulang hingga kondisi terbaik tercapai pada pola input-output berdasarkan nilai minimum dari sum of the squared errors (SSE) yang dinyatakan dengan pers. (11):

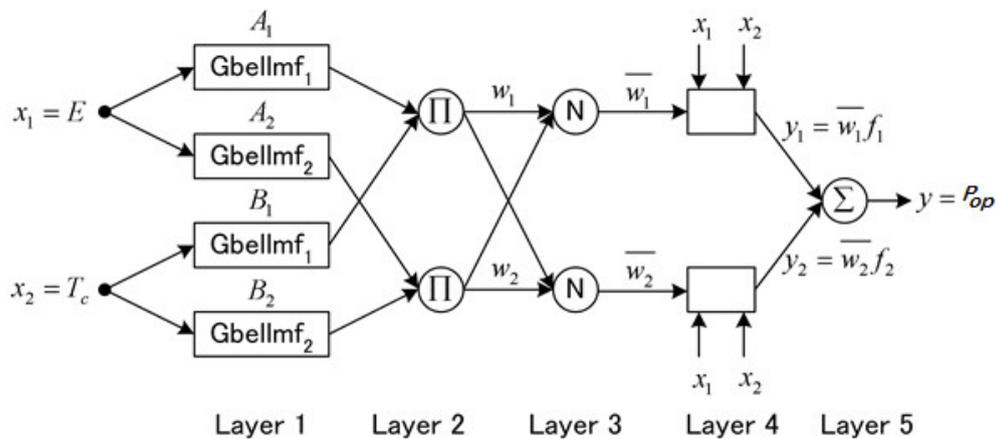


$$SSE(k) = \sum_j (O_j(k) - P_{op}(k))^2 \quad (11)$$

Dengan N adalah total jumlah pola training, $t(k)$ adalah target output ke- k dari daya maksimum actual dan $O(k)$ adalah nilai daya estimasi (P_{op}). Untuk semua pola training, fungsi error dievaluasi dan weight koneksi w_{ij} di-update untuk meminimalisasi error pada pers. (11).

II. 2. 3. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

Untuk Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Neural Network, biasanya sengaja didesain untuk output tunggal. Metode ini sering disebut *Sugeno type fuzzy inference systems* (FIS). Metode ini merupakan kombinasi hibrid algoritma pembelajaran antara metode least-square dan metode back propagation dengan gradient descent untuk proses training parameter FIS *membership functions*. Konsekuensi dari pendekatan ini adalah proses training bisa sangat cepat dengan konfigurasi struktur jaringan yang langsung bisa diperoleh. Selama proses training, sekali jumlah epoch dicapai, maka proses training dihentikan. Pada simulasi ini, kita memilih jumlah epoch set sebanyak 20.



Gambar 4. Struktur dasar jaringan ANFIS

Konfigurasi dasar dari metode ANFIS ini bisa dinyatakan pada Gambar 4. Untuk model Sugeno fuzzy orde pertama, maka if-then rules bisa dinyatakan sebagai berikut [A.A. Elbaset & T. Hiyama, 2009]:

Rule 1: If x_1 is A_1 and x_2 is B_1 , then $y_1 = p_1 x_1 + q_1 x_2 + r_1$

Rule 2: If x_1 is A_2 and x_2 is B_2 , then $y_2 = p_2 x_1 + q_2 x_2 + r_2$

dengan A_1, A_2, B_1 dan B_2 disebut premise parameters dan p, q, r adalah parameter koefisien melalui bentuk polynomial orde pertama:



$$y = \bar{w}_1 (p_1 x_1 + q_1 x_2 + r_1) + \bar{w}_2 (p_2 x_1 + q_2 x_2 + r_2)$$

$$(12)$$

dengan x_1, x_2 adalah signal input dan y_n adalah signal keluaran berdasarkan fuzzy rule yang telah diset sebelumnya.

Struktur yang ditunjukkan pada Gambar 4 di atas mempunyai 5 layer, dimana setiap layer menghasilkan output tertentu, yang ditandai dengan O_l .

Layer 1: Layer ini digunakan untuk membangkitkan *grade of membership function* dari signal input. Setiap node pada layer ini adalah node yang adaptif dengan outputnya bisa dinyatakan sebagai:

$$O_1 = \mu_{A_i}(x) \tag{13}$$

dimana $\mu_A(x)$ adalah membership function dengan variabel linguistik A pada setiap node. Hal ini menjadi bagian penting dari jaringan ANFIS dengan memilih tipe dan jumlah membership function untuk setiap signal input. Pada penelitian ini, kita memilih generalized bell membership function ‘gbellmf’ dan diset 2 kali untuk setiap input E dan T_c . Settingan ini adalah default untuk proses training dengan jaringan ANFIS, tetapi pendekatan yang diambil cukup akurat untuk mapping antara signal input dengan estimasi daya keluaran (P_{op}) modul photovoltaik. Tingkat akurasi yang lebih tinggi bisa dicapai dengan menambahkan jumlah membership function untuk setiap input, tetapi progres simulasi akan menjadi lambat.

Layer 2: Layer ini digunakan untuk mengenerate firing strength yang dinyatakan dengan perkalian sederhana yang ditandai dengan π . Setiap node pada lapisan ini menghasilkan firing strength dengan rules perkalian yang dibangkitkan pada layer pertama. Nilai keluaran dari layer-2 bisa dinyatakan dengan:

$$O_2 = w_i = \prod_{j=1}^m \mu_{A_j}(x) \tag{14}$$

Layer 3: Layer ini untuk normalisasi (N) firing strength yang dibangkitkan pada layer kedua. Node ke- i dari layer 3 menghitung rasio dari rules firing strength ke- i ke rules firing strength keseluruhan. Bagian ini secara sederhana diformulasikan sebagai:



w_2

(15)

ini menghitung rule output berdasarkan parameter konsekuen; p, q and r yang

ditentukan dengan algoritma kuadrat terkecil (least square algorithm) Sama halnya dengan layer-1, layer-4 ini berisi node adaptif dan melakukan adjustment parameter. Keluaran dari layer-4 merupakan perkalian sederhana antara firing strength yang dinormalisasi dengan polinomial orde pertama, seperti ditunjukkan berikut:

$$O_4 = y_1 = \overline{w_1}(p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \quad (16)$$

untuk $i = 1, 2, 3, \dots$

Layer 5: Layer ini merupakan layer keluaran dengan spesifikasi untuk node tunggal, ditandai dengan sigma. Nilai yang diperoleh ditentukan dengan penjumlahan semua input signal dari layer-layer sebelumnya. Secara matematik, persamaan untuk layer-5 bisa dinyatakan dengan:

$$O_5 = \sum_i y_i = \sum_i \overline{w_1}(p_1 x_1 + q_1 x_2 + r_1) + \overline{w_2}(p_2 x_1 + q_2 x_2 + r_2) + \dots \quad (17)$$

II. 3. Tinjauan Sel Surya berbasis non-kristal silikon

Dewasa ini, implementasi pasar sel surya tumbuh dengan baik secara luas. Dalam hal ini, teknologi non-kristal (nc-Si) silikon mulai membuat terobosan signifikan ke pasar sel surya. Sebagian besar jaringan saraf tiruan (JST) telah digunakan dalam aplikasi pelacakan titik daya maksimum untuk teknologi sel surya nc-Si. Namun, ada kecenderungan jenis sel surya yang berbeda memunculkan karakteristik tegangan dan arus yang berbeda pula. Berdasarkan alasan ini, sangat penting untuk menilai kinerja jaringan saraf tiruan terhadap penentuan daya maksimum sel surya yang optimal. Tiga struktur JST yang berbeda, seperti basis radial function (RBF), adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) dan three layered feed-forward neural network (TFFN) untuk mengidentifikasi tegangan operasi optimal modul non-kristal silikon sel surya. Model-model ini akan diverifikasi untuk teknologi sel surya, misalnya double junction amorphous Si (2j a-Si), triple junction amorphous Si (3j a-Si), Cadmium Indium Diselenide (CIS) dan thin film Cadmium Telluride (CdTe). Hasil penelitian menunjukkan bahwa fleksibilitas proses training, kesederhanaan struktur jaringan dan tingkat keakuratan validasi merupakan merupakan faktor penting untuk memilih model JST yang sesuai.

Sistem cerdas dengan cara jaringan syaraf tiruan (JST) sukses dalam menyelesaikan persoalan optimasi masalah keteknikan. Kelebihan metode JST dibandingkan metode



adalah teknik komputasi sederhana dan kemampuan pengenalan pola yang Kalogirou, 2008; Mellit, et.al, 2009; Giraud & Salameh, 1999; Mellit & 2006). Sebagai teknik optimasi yang matang, ada banyak konfigurasi JST nfigurasi ini mungkin memiliki kelebihan dan kelemahan sendiri dari yang

konfigurasi yang lain dalam aplikasi yang berbeda. Sebagai contoh, jaringan saraf tiruan dengan model radial basis function (RBF) sangat cepat selama proses training dan struktur langsung dikonfirmasi setelah training. Namun, mungkin ada kesalahan kecil terjadi dalam metode RBF selama proses validasi. Di sisi lain, metode adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) juga merupakan metode yang sangat kuat dengan akurasi output tinggi selama proses training dan validasi. Keakuratan metode ini kemungkinan tergantung pada jenis dan jumlah fungsi keanggotaan untuk sinyal input. Namun, jaringan ini umumnya dirancang untuk satu output. Oleh karena itu, untuk masalah optimisasi yang basisnya multi-objektif, diperlukan jaringan multi ANFIS dan setiap jaringan harus dilatih secara terpisah. Dibandingkan dengan dua metode sebelumnya, metode three layered feed-forward neural network (TFFN) membutuhkan keputusan intuitif pembuat program untuk menentukan struktur jaringan terbaik. Masalah dari metode ini adalah terlalu banyak kemungkinan struktur jaringan yang dapat dipilih selama proses pelatihan (G. Tina, and G. Capizzi, 2008).

Jaringan saraf tiruan secara kompatibel berhasil menyelesaikan masalah optimisasi sistem panel surya karena kemampuan menyesuaikan persoalan karakteristik non-linear sel surya (Sun, et.al, 2002). Dalam aplikasi kontrol pelacakan titik daya maksimum (MPPT), metode JST sangat berguna untuk mengidentifikasi titik MPP global secara langsung tanpa menyelesaikan persamaan non-linear. Salah satu metode MPPT yaitu memanfaatkan tegangan optimal sebagai sinyal referensi (Syafaruddin, et.al, 2009 (2), de Medeiros Torres, et.al, 1998). Tegangan optimal dipertimbangkan karena parameter ini bervariasi oleh faktor lingkungan dan trend kurva-nya unik dengan jenis sel surya yang berbeda. Selain itu, dalam kondisi pencahayaan sel surya yang berubah-ubah, tegangan optimal mungkin bergerak secara signifikan dalam karakteristik I-V. Dari sudut pandang ini, lebih banyak perhatian masih diperlukan untuk menangani masalah optimisasi MPP dari sistem PV dalam setiap skenario pengukuran.

Beberapa studi dengan menggunakan JST dalam aplikasi sistem panel surya telah dilakukan sejauh ini. Sebagian besar, metode JST digunakan untuk meramalkan kapasitas daya output panel surya dengan memperkirakan tingkat pencahayaan (Yona, et.al, 2008; Paul, et.al, 2008 & Mellit, et.al, 2008). Pada penelitian lain, metode JST dikombinasikan dengan teknik optimisasi lainnya (Zhou, et.al, 2008 (2)) digunakan untuk menentukan penyaluran daya optimal di bawah beban acak (Momoh, et.al, 2004); dengan pendekatan optimisasi heuristik untuk biaya operasi dari sistem microgrid berbasis representatif panel surya (Simoes, 2008) dan dengan pemrograman evolusionery computing untuk nilai optimal untuk jumlah node tersembunyi (Sulaiman, et.al, 2009). Studi



daya baterai tenaga surya untuk pengontrol MPPT (Petchjatuporn, et.al, 2005). JST juga digunakan untuk mengoptimalkan duty ratio konverter buck-boost yang mengambil faktor lingkungan sebagai sinyal input (Narri & Mummadi, 1999; Jae-Sub, et.al, 2008).

Sebagian besar metode JST yang diusulkan menggunakan struktur multi layer perceptron (MLP). Struktur ini terkadang memiliki beban komputasi yang lebih tinggi, terutama untuk jaringan feed-forward. Metode RBF dipergunakan pada (Chao, et.al, 2008) untuk memberikan tegangan referensi untuk pengontrolan MPPT dan pada (Mellit, et.al, 2007) untuk menjustifikasi proposisi prosedur pengukuran baru sistem panel surya yang berdiri sendiri. Menggabungkan dengan regulator neuro-fuzzy, metode RBF telah digunakan untuk meningkatkan efisiensi sistem panel surya (Varnham, et.al, 2007). Model ANFIS telah digunakan untuk melatih secara individu pada setiap komponen sistem panel surya dalam kondisi iklim yang bervariasi (Mellit & Kalogirou, 2006). Terkait dengan teknologi sistem panel surya, para peneliti masih berkonsentrasi pada pemodelan dan simulasi teknologi berbasis kristal silikon (Villalva, et.al, 2009), sementara teknologi sel surya berbasis non-kristal silikon berkembang pesat dan telah memasuki pasar panel surya. Pemodelan efek spektral pada arus hubung singkat sel surya amorphous Silicon (a-Si) dapat ditemukan di (Beyer, et.al, 2003).

Dalam penelitian ini, kinerja tiga struktur jaringan saraf tiruan yang berbeda yaitu metode RBF, ANFIS dan TFFN diuji dan diinvestigasi dengan modul panel surya berbasis non-kristal silikon. Semua struktur JST dilatih menggunakan tegangan pada titik daya maksimum (V_{MPP}) sebagai target. Konfigurasi jaringan terbaik yang diperoleh divalidasi untuk empat skenario berbeda. Hasil menunjukkan bahwa fleksibilitas proses pelatihan, kesederhanaan struktur jaringan dan akurasi kesalahan validasi merupakan faktor penting dalam memilih jaringan yang cocok untuk jenis teknologi panel surya.

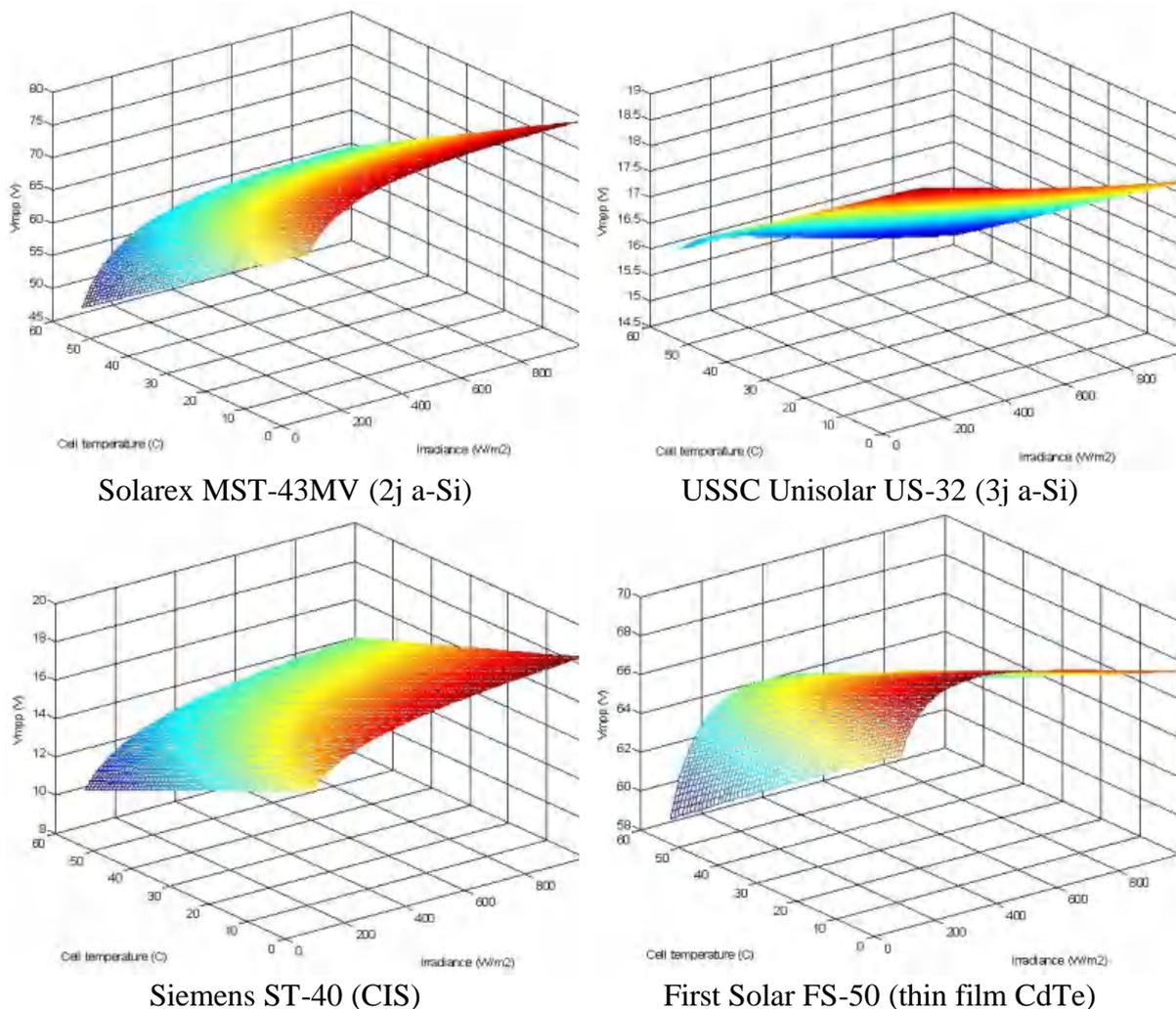
Sel surya dengan teknologi kristal silikon adalah teknologi yang banyak ditemukan pada pasar panel surya, tetapi penjualan telah meluas secara signifikan untuk sel surya non-kristal silikon karena pengembangan teknologi material nano. Alasan utama dari kecenderungan ini adalah memangkas biaya produksi teknologi kristal silikon konvensional.

Panel surya dengan spesifikasi $1000W/m^2$ dan $25^{\circ}C$ disajikan pada Tabel 4. Solarex MST-43MV dan USSC UniSolar US-32 panel surya adalah masing-masing tandem junction and triple junction thin-film module amorphous silicon cells. Sel surya ini dirancang untuk



gunakan konversi spektrum cahaya matahari. Teknologi tandem junction menggunakan dengan mendepositkan paduan semikonduktor pada lapisan tipis kaca. Junction menumpuk dua atau tiga sel surya secara vertikal, dengan masing-masing untuk konversi optimal untuk berbagai segmen spektrum. Di sisi lain, Siemens

ST-40 dan First Solar FS-50 masing-masing adalah modul CIS dan CdTe PV film film. Modul ST-40 terdiri dari struktur monolitik sel surya berbasis tembaga Indium Diselenide (CIS) yang terkoneksi seri. Sel-sel surya multi-lapisan ini ditandai dengan respons spektral yang luar biasa dan integritas kinerja jangka panjang. Sedangkan, FS-50 menggunakan lapisan bahan semikonduktor senyawa yang sangat tipis dengan koefisien suhu rendah yang menghasilkan biaya yang efektif dan produksi energi yang lebih besar.



Gambar 5. Tegangan pada titik maksimum (V_{MPP}), irradiance: (100-1000 W/m^2) dan temperatur sel: (10-60°C)

Table 4. Spesifikasi panel surya berbasis non-kristal silikon



PV modules	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_{MPP} (A)	V_{MPP} (V)	P_{MPP} (W)
ST-43MV	0.787	101.0	0.616	71	43.74
US-32	2.4	23.8	1.94	16.5	32.01
ST-40	2.59	22.2	2.41	16.6	40.00
FS-50	1.0	90	0.77	65	50.05

Sama halnya dengan jenis modul kristal silikon, modul panel surya juga ini dimodelkan mengikuti model karakteristik kurva I-V yang dikembangkan oleh Sandia National Laboratory (D.L. King, 1997, 2000). Karakteristik arus hubung singkat dan tegangan hubung terbuka hampir serupa untuk semua jenis sel surya semikonduktor. Namun, mungkin ada karakteristik yang berbeda pada tegangan titik daya maksimum. Karakteristik VMPP ditunjukkan pada Gambar 5. Dapat dilihat dari gambar ini bahwa korelasi antara tegangan optimal dan suhu dan irradiansi sel untuk setiap modul adalah non-linear. Dalam hal ini, melacak tegangan optimal menggunakan teknik cerdas dengan cara JST dapat memberikan solusi yang sangat baik.

