

Rancang Bangun dan Optimasi Panel Surya Berpenjejak dengan Logika Fuzzy Takagi-Sugeno

Suci Imani Putri, Hadi Suyono, dan Rini Nur Hasanah

Abstrak—Secara global penggunaan sel surya meningkat sebagai akibat peningkatan pemanfaatan sumber energi matahari untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dunia. Untuk mengoptimalkan penyerapan energi matahari digunakan panel surya berpenjejak (*sun-tracking solar system*), yang merupakan suatu sistem untuk mengendalikan posisi panel surya agar selalu mengikuti arah dan posisi matahari sehingga sel surya dapat diserap secara maksimal. Pada artikel ini dipaparkan hasil penelitian mengenai implementasi logika fuzzy pada panel surya berpenjejak yang menggunakan motor DC untuk mengatur posisi panel surya. Fuzzifikasi dilakukan menggunakan metode Takagi-Sugeno. Algoritma pengendalian diimplementasikan pada mikrokontroler ATmega 128 menggunakan program BASCOM-AVR. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan tegangan keluaran sensor sel surya (V_{out}) sebesar 0,40V dibandingkan dengan panel surya tanpa perhitungan logika fuzzy. Validasi hasil perhitungan logika fuzzy dengan metode Takagi-Sugeno dengan cara membandingkannya dengan metode Tsukamoto menunjukkan perbedaan hasil pengujian tegangan keluaran sensor sel surya yang tidak signifikan (0,001V), namun komputasi Takagi-Sugeno lebih efisien karena memanfaatkan penggabungan perhitungan logika fuzzy dengan dua keluaran sekaligus, dibandingkan dengan metode Tsukamoto yang melakukan perhitungan pada keluaran fuzzy satu per satu.

Kata Kunci—Logika Fuzzy, Metode Takagi-Sugeno, LDR (*Light Dependent Resistor*), Motor DC, Pulsa Rotary Encoder.

I. PENDAHULUAN

KEBUTUHAN energi listrik semakin tinggi karena peningkatan pembangunan industri dan kebutuhan komunikasi. Peningkatan kebutuhan ini tidak sebanding dengan keterbatasan ketersediaan sumber daya energi, sehingga perlu dicari alternatif-alternatif untuk mengatasinya. Salah satu alternatif yang dapat dilakukan adalah pemanfaatan sumber energi matahari menggunakan sensor *solar cell* atau *photovoltaic* (selanjutnya disingkat PV) dalam bentuk panel surya.

Suci Imani Putri adalah mahasiswa Program Studi Magister Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya Malang (Cell-phone: 082230108007; email suci.imaniputri@yahoo.com)

Hadi Suyono adalah dosen di Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang (email: hadis@ub.ac.id).

Rini Nur Hasanah adalah dosen di Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang (email: rini.hasanah@ub.ac.id)

Terhitung sejak tahun 2000 telah terjadi peningkatan kapasitas PV sebesar 40%, yang merupakan potensi yang signifikan untuk pemenuhan kebutuhan energi selama satu dekade mendatang. *Roadmap* yang dibuat oleh *International Energy Agency* (IEA) memperkirakan bahwa pada tahun 2050 PV akan menyumbang 11% atau sebesar 3000 Gigawatt dari produksi listrik global [1] serta memberikan kontribusi yang sangat berarti dalam mewujudkan keterjaminan ketersediaan energi dunia.

Pada umumnya penggunaan PV belum optimal, sehingga mendorong dilakukannya usaha-usaha untuk mengembangkan dan meningkatkan optimalitas penggunaannya. Salah satu usaha dilakukan melalui pengaturan posisi kolektor sinar matahari agar selalu tepat dengan arah matahari menggunakan panel surya berpenjejak (*sun-tracking solar system*), yang telah banyak dijadikan bahan penelitian [2]. Pelacakan posisi matahari dapat dilakukan berdasarkan ekspansi termal PV (*passive trackers*) maupun secara elektrik menggunakan motor DC, *gear box* dan lainnya (*active trackers*).

Pada penelitian yang hasilnya dipaparkan dalam artikel ini, dirancang implementasi logika fuzzy pada suatu sistem pelacak aktif, yang dapat bekerja dengan baik pada sistem nonlinier kontinu dengan ketidakpastian yang besar, mampu mendeteksi perubahan cuaca, mampu melakukan *reset* saat terdeteksi ketiadaan cahaya, serta mampu melacak intensitas cahaya secara *real time* dan tepat sesuai posisi sudut arah matahari.

Penerapan logika fuzzy (*Fuzzy Inference System*, selanjutnya disingkat dengan FIS) dapat dilakukan menggunakan berbagai metode, diantaranya adalah metode Tsukamoto, metode Mamdani, dan metode Takagi-Sugeno [3]. Pada metode Tsukamoto, setiap konsekuen direpresentasikan dengan himpunan fuzzy dengan fungsi keanggotaan monoton. Output hasil inferensi masing-masing aturan dinyatakan dengan z , yang berupa himpunan biasa (*crisp*) yang ditetapkan berdasarkan μ -predikatnya (derajat keanggotaan). Hasil akhir diperoleh dengan menggunakan rata-rata terbobotnya. Metode Sugeno mirip dengan metode Mamdani, hanya saja *output*(konsekuen)-nya tidak berupa himpunan fuzzy, melainkan berupa konstanta atau persamaan linear. Pada metode Mamdani aplikasi fungsi implikasi menggunakan *MIN*, sedang komposisi

aturan menggunakan metode *MAX*, sehingga metode Mamdani dikenal juga dengan metode *MAX-MIN*. Karena inferensi output yang dihasilkan berupa bilangan *fuzzy* maka harus ditentukan suatu nilai *crisp* tertentu sebagai *output* (konsekuen). Pada penelitian ini inferensi *fuzzy* dilakukan menggunakan metode Takagi-Sugeno. Metode ini dipilih karena komputasinya lebih efisien, bekerja paling baik untuk teknik-teknik linier serta optimasi dan sistem adaptif, serta menjamin kontinuitas hasil [4].

Alat yang dirancang dengan FIS Takagi-Sugeno mampu mengurangi penggunaan daya karena proses pelacakan tidak dilakukan sambil menggerakkan motor DC secara terus menerus. Sebelum motor DC digerakkan, posisi panel surya dihitung terlebih dahulu menggunakan logika *fuzzy* didasarkan pada data masukan yang dihasilkan oleh sensor LDR.

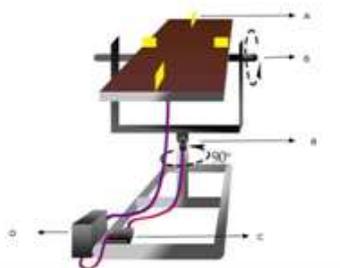
II. PERANCANGAN ALAT

Penelitian ini bertujuan merancang dan membuat panel surya berpenjejak dengan logika *fuzzy* metode FIS Takagi-Sugeno untuk mengoptimalkan tegangan keluaran panel surya. Perancangan dengan perhitungan logika *fuzzy* FIS Takagi-Sugeno digunakan karena komputasinya lebih efisien sehingga mampu mengurangi penggunaan daya saat melakukan pelacakan cahaya matahari.

Perancangan alat dilakukan dalam tiga tahap yaitu perancangan sistem mekanik, perancangan sistem elektrik dan perancangan sistem perangkat lunak.

A. Perancangan Sistem Mekanik

Dalam perancangan sistem mekanik digunakan 1 buah sensor *solar cell*, 4 buah sensor LDR (*Light Dependent Resistor*), 2 buah sensor *rotary encoder*, 1 buah sensor suhu LM35, 2 buah motor DC, serta 1 buah LCD (*Liquid Crystal Display*), dengan disain konstruksi seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1 Disain konstruksi panel surya berpenjejak

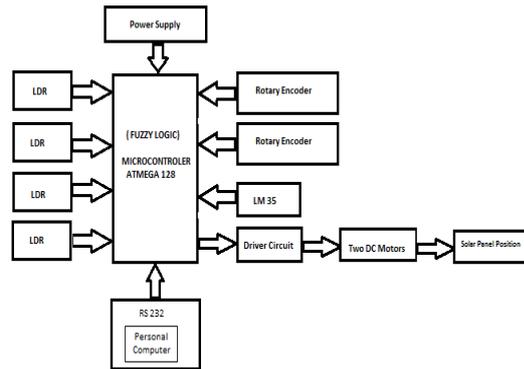
Prinsip kerja panel surya berpenjejak didasarkan pengambilan data oleh sensor LDR dan sensor suhu LM35, yang kemudian diolah dengan menggunakan perhitungan logika *fuzzy* untuk menghasilkan aksi pergerakan motor DC supaya menempatkan panel surya pada posisi optimalnya. Pada perancangan ini pergerakan sudut ke setiap arah diberikan batasan untuk arah utara dan selatan sebesar 49°, dan untuk arah timur dan barat sebesar 70°. Perubahan sudut untuk pergerakan motor DC terhadap panel surya ditentukan

berdasarkan pengujian secara manual untuk mendapatkan intensitas cahaya terbesar yang dibutuhkan panel surya agar tegangan keluaran dapat selalu maksimal.

Hasil perhitungan logika *fuzzy* berupa 4 nilai yang merepresentasikan jumlah putaran motor DC. Satu putaran motor DC ekuivalen dengan 70 pulsa sensor *rotary encoder* atau sama dengan perubahan sudut sebesar 4,9°.

B. Perancangan Sistem Elektrik

Blok diagram perancangan sistem elektrik ditunjukkan dalam Gambar 2.

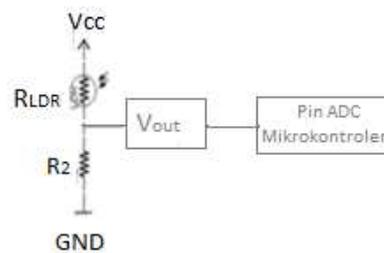


Gambar 2 Blok diagram sistem elektrik Alat

Perancangan sistem elektrik digunakan untuk keempat sensor LDR yang digunakan, untuk *driver* kedua motor DC, 2 sensor rotary encoder, 1 sensor suhu LM35, dan *power supply*.

▪ Sensor LDR (*Light Dependent Resistor*)

Sensor LDR digunakan untuk mengetahui besar intensitas cahaya di sekitar panel surya. Sebuah LDR memiliki resistansi sekitar 1 MΩ dalam kondisi gelap gulita dan kurang dari 1 KΩ ketika ditempatkan dibawah sumber cahaya terang [7].



Gambar 3 Rangkaian sistem elektrik sensor LDR

Intensitas cahaya pada rancangan ini dikonversi dalam besaran tegangan 0 – 5V agar selanjutnya dapat diolah menggunakan mikrokontroler. Nilai tegangan keluaran sensor LDR digunakan sebagai nilai masukan logika *fuzzy* untuk menentukan cuaca di sekitar panel surya, yaitu cuaca mendung, panas, atau panas terik.

Rangkaian elektrik sensor LDR ditunjukkan pada Gambar 3, dengan tegangan keluaran sensor ditentukan sebagai berikut:

$$V_{out} = (V_{cc} \cdot xR_2) \cdot x(R_2 \cdot xR_{ldr})^{-1} \tag{1}$$

dengan,

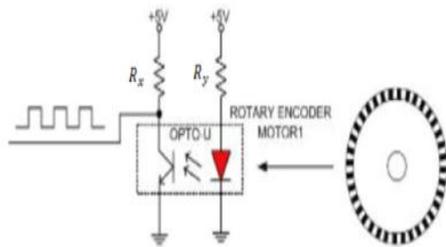
V_{out} : Tegangan keluaran sensor LDR (volt)

V_{cc} : Tegangan kerja mikrokontroler (3,3 – 5,0 V)
 R_{ldr} : Besar nilai resistor yang dihasilkan berdasarkan besar cahaya (LDR) (ohm)

Pada perancangan alat, digunakan 4 sensor LDR yang dihubungkan dengan mikrokontroler ATmega 128 pada Pin ADC yaitu pin ADC.4,5,6,7.

▪ Rangkaian Sensor Rotary Encoder

Sensor *rotary encoder* dihubungkan dengan pin PD.6 dan PD.7 pada mikrokontroler ATmega 128. Jumlah pulsa yang dihasilkan sensor *rotary encoder* membantu mikrokontroler dalam menentukan jumlah putaran motor DC yang selanjutnya dikonversi menjadi besar perubahan sudut. Perubahan sudut yang dihasilkan adalah *output* perhitungan logika fuzzy dalam menentukan posisi panel surya dari posisi diam (*default*). Rancangan sistem elektrik sensor *rotary encoder* ditunjukkan dalam Gambar 4.



Gambar 4 Perancangan Sensor Rotary Encoder

Komponen pada Gambar 4 adalah berupa piringan *acrylic* dan *optocoupler*. Piringan *acrylic* berfungsi sebagai penghalang diantara sinar inframerah dan photodiode. *Acrylic* yang digunakan memiliki ketebalan 1mm dengan warna gelap agar cahaya dr inframerah ke photodiode tidak tembus kecuali pada lubang yang telah disediakan. Untuk asumsi jumlah resolusi sensor digunakan perancangan sebesar 70 pulsa untuk setiap putaran penuh.

Optocoupler diletakkan diantara sisi piringan *acrylic* yang terdapat lubang-lubang yang disediakan untuk melewati dan menutup cahaya dari LED pada *optocoupler*. Komponen *optocoupler* ini merupakan kombinasi inframerah dan photodiode sebagai pemancar dan penerima cahaya.

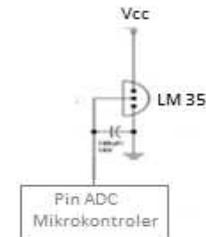
Resistansi yang digunakan pada rangkaian listrik sensor *rotary encoder* pada alat ini adalah R_x sebesar 10 k Ω dan R_y sebesar 24 k Ω , besar nilai R_x dan R_y pada perancangan ini didapatkan berdasarkan analisis komponen *optocoupler* dari datasheet optocoupler U untuk tegangan dan arus maksimal yang pada prosnya membantu memaksimalkan cahaya LED pada inframerah dan membantu photodiode dalam menerima cahaya.

▪ Rangkaian Sensor Suhu LM35

Sensor suhu LM 35 dihubungkan dengan pin ADC.3 pada mikrokontroler ATmega 128. Sensor suhu ini dirancang untuk dapat mendeteksi suhu dari 0-100°C. Deteksi suhu diperlukan untuk membantu alat sebelum logika fuzzy melakukan perhitungan untuk menentukan posisi panel surya. Karena, saat suhu dibawah 20°C, maka perhitungan logika fuzzy tidak perlu

dilakukan karena suhu tersebut menunjukkan cuaca hujan. Pada alat ADC yang digunakan adalah ADC adalah mikrokontroler dengan resolusi 10 bit. Pemilihan 10 bit banyaknya nilai diskrit yang dihasilkan pada skala tegangan yang pada penelitian ini digunakan 5 Volt. Yang berarti 5 volt akan memiliki resolusi tegangan ADC adalah sebesar 4,88 mV setiap kenaikan 1 bit. Nilai resolusi ini cukup untuk penggunaan daya pada alat dari setiap sensor yang digunakan.

Rangkaian sensor suhu LM 35 pada penelitian ini ditunjukkan dalam 5.



Gambar 5 Rangkaian sensor suhu LM35

Untuk perhitungan suhu dengan sensor LM 35 berdasarkan *datasheet*, perhitungan sensor suhu LM35 dilakukan seperti yang ditunjukkan dalam persamaan 2.

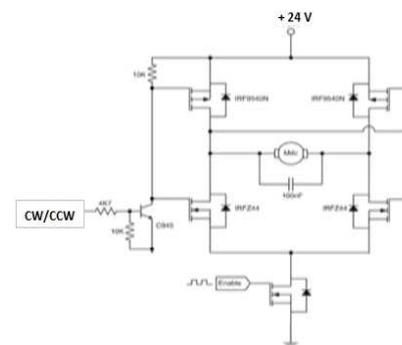
$$V_{\text{out sensor}} = T \times 10\text{mV} \quad (2)$$

dengan,

T = Suhu terdeteksi LM35.

▪ Rangkaian Driver Motor DC

Panel surya berpenjejak dalam penelitian ini menggunakan dua buah motor DC, yang masing-masing berfungsi untuk menggerakkan panel surya ke dua arah yaitu timur-barat atau utara-selatan. *Driver* motor DC dihubungkan dengan pin PB.5,6 dan PD.0,1 pada mikrokontroler ATmega 128. Rangkaian *driver* motor DC yang digunakan ditunjukkan dalam Gambar 6.



Gambar 6 Rangkaian Driver Motor DC

Rangkaian driver didasarkan pada prinsip *driver H-Bridge* yang menggunakan dua buah MOSFET kanal P dan dua buah MOSFET kanal N. Pengaturan hidup dan matinya keempat MOSFET tersebut digunakan untuk mencatu besarnya daya yang diberikan serta arah kemana akan berputar motor DC. Dengan simbol M

menggambarkan motor DC yang dikendalikan, bagian atas rangkaian dihubungkan dengan kutub positif sumber tegangan, sedangkan bagian bawah rangkaian dihubungkan dengan kutub negatif sumber tegangan. Pada saat MOSFET A dan MOSFET D *on* sedangkan MOSFET B dan MOSFET C *off*, maka sisi kiri dari gambar motor akan terhubung dengan kutub positif dari catu daya, sedangkan sisi sebelah kanan motor akan terhubung dengan kutub negatif dari catu daya sehingga motor akan bergerak searah jarum jam (*clockwise*).

Penggunaan 4 buah MOSFET pada rangkaian kontrol motor DC H-Bridge yang ditunjukkan dalam Gambar 6 adalah sebagai saklar elektronik untuk mengalirkan arus ke motor DC secara bridge. Sehingga saklar akan aktif dan non aktif secara bergantian bergantung pada arah motor akan bergerak (*clockwise* atau *counter clockwise*). Selain itu, penggunaan empat buah dioda yang dipasang *parallel* secara *reverse* berfungsi sebagai *clamber diode*.

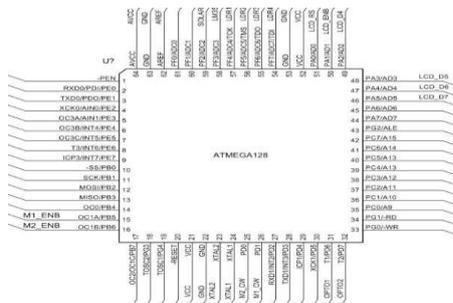
Dimana *Clamber* dioda berfungsi untuk melindungi transistor dari lonjakan tegangan balik induksi dari motor DC dan untuk penggunaan resistor 10 kΩ digunakan sebagai *pull-down* untuk memastikan jalur input dalam keadaan logika *LOW* pada saat saklar input terbuka.

A. Rancangan Sistem Perangkat Lunak

Perancangan sistem perangkat lunak digunakan untuk perhitungan logika fuzzy dan alokasi pin I/O mikrokontroler ATmega 128 sebagai pusat pengolahan data sistem.

▪ Rancangan I/O Mikrokontroler ATmega 128

Alokasi pin-pin I/O mikrokontroler ATmega 128 pada perancangan ini ditunjukkan dalam Gambar 7.



Gambar 7 Rancangan I/O Mikrokontroler ATmega 128

▪ Rancangan Perhitungan Logika Fuzzy

Rancangan perhitungan logika fuzzy pada penelitian ini meliputi proses Fuzzifikasi, Penentuan *Rule Base*, dan Defuzzifikasi hingga akhirnya didapatkan nilai Z sebagai output dari hasil perhitungan logika fuzzy.

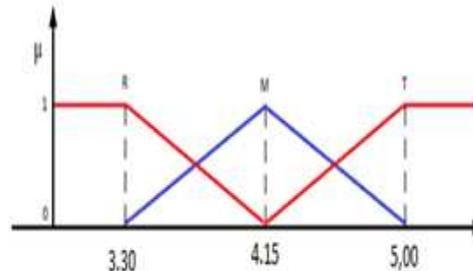
1. Penentuan Membership Function (Fuzzifikasi)

Penentuan *membership function* dilakukan dengan cara mengambil data dari sensor LDR selama 10 hari untuk menentukan tegangan terendah hingga tertinggi agar didapatkan nilai tengah tegangan keluaran sensor LDR. Hal ini digunakan untuk menentukan rentang kawasan masukan logika fuzzy saat menentukan cuaca.

Grafik *membership function* menggunakan tiga himpunan fuzzy berupa tegangan keluaran (V_{out}) sensor LDR yang akan naik dan turun berdasarkan intensitas

cahaya yang diterima, yang direpresentasikan kurva segitiga dimana anggota himpunan fuzzy berupa cuaca yaitu mendung (R), panas (M), dan panas terik (T). Pada penelitian ini digunakan empat sensor LDR yang juga menggunakan tiga himpunan fuzzy yang sama.

Himpunan fuzzy LDR dengan derajat keanggotaan semakin tinggi ketika nilai tegangan keluaran sensor LDR semakin tinggi pada nilai 3,30 Volt pada himpunan mendung, 4,15 pada himpunan panas dan 5,00 pada himpunan panas terik seperti ditunjukkan dalam Gambar 8.



Gambar 8 Membership function masukan logika fuzzy

Pengujian secara manual dilakukan untuk mendapatkan data cuaca sebagai masukan perhitungan logika fuzzy.

Pada Gambar 8 maka didapatkan 81 kombinasi dari empat LDR yang masing-masing memiliki himpunan fuzzy, yaitu LDR 1 ke-i (R_{1i}), LDR 2 ke-i (R_{2i}), LDR 3 ke-i (R_{3i}), dan LDR 4 ke-i (R_{4i}) dengan anteseden Z ke-I, dengan i adalah jumlah aturan fuzzy yang sudah mencakup semua variable himpunan keanggotaan fuzzy.

Nilai tegangan keluaran (V_{out}) yang terdeteksi dari sensor LDR akan melalui proses fuzzifikasi, masing-masing LDR akan berada pada himpunan fuzzy mendung, panas dan panas terik berdasarkan nilai data LDR yang telah dicuplik dan kemudian didapatkan derajat keanggotaan untuk masing-masing himpunan.

Fungsi Keanggotaan:

Mendung (R):

$$\mu[R] = \begin{cases} 1, & x \leq 3,30 \\ 0, & x \geq 4,15 \\ \frac{4,15-x}{4,15-3,30}, & 3,30 < x < 4,15 \end{cases} \quad (3)$$

Panas (M):

$$\mu[M] = \begin{cases} 0, & x \leq 3,30 \text{ atau } x \geq 5,00 \\ \frac{x-3,30}{4,15-3,30}, & 3,30 < x \leq 4,15 \\ \frac{5,00-x}{5,00-4,15}, & 4,15 < x < 5,00 \end{cases} \quad (4)$$

Panas Terik (T):

$$\mu[T] = \begin{cases} 1, & x \geq 5,00 \\ 0, & x \leq 4,15 \\ \frac{x-4,15}{5,00-4,15}, & 4,15 < x < 5,00 \end{cases} \quad (5)$$

Penentuan derajat keanggotaan atau disebut juga proses fuzzifikasi dilakukan dengan persamaan yang ditunjukkan pada persamaan 3, 4, dan 5.

Berikut adalah penentuan derajat keanggotaan

masing-masing LDR jika diketahui nilai LDR 1, LDR 2, LDR 3 dan LDR 4 berturut-turut adalah 4,81 Volt, 4,82 Volt, 4,93 Volt dan 4,79 Volt, didapatkan derajat keanggotaan mendung, panas dan panas terik untuk masing-masing LDR sesuai dengan persamaan adalah sebagai berikut:

$$\mu[\text{LDR 1} = 4,81] \begin{cases} \mu_R = 0 \\ \mu_M = 0,22 \\ \mu_T = 0,78 \end{cases}$$

$$\mu[\text{LDR 2} = 4,82] \begin{cases} \mu_R = 0 \\ \mu_M = 0,21 \\ \mu_T = 0,79 \end{cases}$$

$$\mu[\text{LDR 3} = 4,79] \begin{cases} \mu_R = 0 \\ \mu_M = 0,25 \\ \mu_T = 0,75 \end{cases}$$

$$\mu[\text{LDR 4} = 4,79] \begin{cases} \mu_R = 0 \\ \mu_M = 0,25 \\ \mu_T = 0,75 \end{cases}$$

2. Penentuan Rule Base

Metode inferensi fuzzy Takagi-Sugeno orde-0 merepresentasikan aturan yang dibentuk berdasarkan data yang mencakup semua variable dengan proposisi dalam himpunan fuzzy, sedangkan konsekuen dalam konstanta [1].

Pada penelitian ini terdapat 81 kombinasi 4 sensor LDR dengan himpunan fuzzy keanggotaan mendung, panas, dan panas terik. Penentuan *rule base IF-THEN* didasarkan pada pengujian secara manual dengan memperhitungkan probabilitas kemungkinan yang terjadi dengan kombinasi variabel.

Penentuan aturan perhitungan logika fuzzy berdasarkan penentuan aturan yang ditentukan oleh metode Takagi-Sugeno.

IF (X_1 is A_1) *and* (X_2 is A_2) *and* (X_3 is A_3) *and* (X_4 is A_4) *THEN* $z=k$.

Pada penelitian ini digunakan empat sensor LDR dengan masing-masing sensor memiliki tiga himpunan fuzzy yaitu mendung, panas dan panas terik. Dari keempat sensor LDR juga ditentukan keluaran Z. Karena panel surya dapat bergerak ke empat arah yaitu timur, utara, barat dan selatan. Maka, pada penelitian ini dirancang hasil perhitungan logika fuzzy dapat menentukan posisi panel surya yang mampu bergerak keempat arah tersebut berdasarkan masukan perhitungan dari empat sensor LDR dengan masing-masing memiliki tiga himpunan fuzzy.

IF (X_1 is A_1) *and* (X_2 is A_2) *and* (X_3 is A_3) *and* (X_4 is A_4) *THEN* $z= [k_1 k_2 k_3 k_4]$.

dengan,

X = Nilai tegangan keuaran (V_{out}) LDR (LDR 1, LDR 2, LDR 3, LDR 4)

A = Himpunan fuzzy keanggotaan LDR (mendung, panas, panas terik)

Z = *Output fuzzy*

$k-i$ = Konstanta tegas (Perubahan sudut ke arah-i)

secara pengujian manual.

Berikut adalah beberapa aturan berdasarkan persamaan dan nilai k_1 , k_2 , k_3 dan k_4 yang didapatkan berdasarkan pengujian secara langsung yang dilakukan secara manual. Beberapa aturan dari 81 aturan yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. IF LDR 1 mendung AND LDR 2 mendung AND LDR 3 mendung AND LDR 4 mendung THEN POSISI IS Motor [0 0 0 0]
2. IF LDR 1 mendung AND LDR 2 mendung AND LDR 3 mendung AND LDR 4 panas THEN POSISI IS Motor [0 0 0 400]
3. IF LDR 1 mendung AND LDR 2 mendung AND LDR 3 mendung AND LDR 4 panas terik THEN POSISI IS Motor [0 0 0 700]
4. IF LDR 1 mendung AND LDR 2 mendung AND LDR 3 panas AND LDR 4 mendung THEN POSISI IS Motor [0 0 600 0]

Pada pengujian hasil rancangan, pergerakan ke arah barat direpresentasikan dengan LDR 1, motor 1 dan k_1 , ke arah selatan direpresentasikan dengan LDR 2, motor 2 dan k_2 , ke arah timur direpresentasikan dengan LDR 3, motor 3 dan k_3 , serta ke arah utara dengan LDR 4, motor 4 dan k_4 .

Derajat keanggotaan untuk masing-masing *rule base* sebagai dasar pengambilan keputusan oleh logika fuzzy yang merupakan kombinasi dengan menggunakan operator minimum implikasi menurut Takagi-Sugeno, operator irisan menggunakan *min*. ditunjukkan dalam persamaan (6).

$$\mu_B = \min [\mu_{i(LDR1)}; \mu_{i(LDR2)}; \mu_{i(LDR3)}; \mu_{i(LDR4)}] \quad (6)$$

dengan,

μ_i = Derajat keanggotaan himpunan masukan fuzzy masing-masing LDR

i = Mendung, panas, panas terik

μ_B = Derajat keanggotaan himpunan keluaran fuzzy untuk masing-masing *rule*

Berikut adalah beberapa contoh penentuan pemilihan derajat keanggotaan dari setiap rule base untuk selanjutnya diproses pada defuzzifikasi untuk menentukan hasil keluaran logika fuzzy.

$$\begin{aligned} [\text{Rule 1}] \quad \mu_1 &= \text{MIN} (\mu_R \text{ LDR 1}, \mu_R \text{ LDR 2}, \mu_R \text{ LDR 3}, \mu_R \text{ LDR 4}) \\ &= \text{MIN} (0; 0; 0; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\text{Rule 2}] \quad \mu_2 &= \text{MIN} (\mu_R \text{ LDR 1}, \mu_R \text{ LDR 2}, \mu_R \text{ LDR 3}, \mu_M \text{ LDR 4}) \\ &= \text{MIN} (0; 0; 0; 0,25) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\text{Rule 3}] \quad \mu_3 &= \text{MIN} (\mu_R \text{ LDR 1}, \mu_R \text{ LDR 2}, \mu_R \text{ LDR 3}, \mu_T \text{ LDR 4}) \\ &= \text{MIN} (0; 0; 0; 0,75) \\ &= 0 \end{aligned}$$

3. Defuzzifikasi

Pada proses defuzzifikasi, hal yang dilakukan adalah menentukan posisi motor yang direpresantasikan dengan nilai Z, yang berupa jumlah perubahan sudut ke arah timur, selatan, barat dan utara. Putaran motor DC direpresentasikan dalam jumlah pulsa hasil perhitungan sensor *rotary encoder* yang kemudian dikonversikan dalam bentuk sudut untuk menentukan posisi panel surya.

Proses defuzzifikasi dilakukan dengan melihat semua

μ -predikat yang tidak bernilai nol dari hasil pengujian perhitungan logika fuzzy pada *rule base*. Jika hanya satu aturan dari 81 aturan yang tidak berangka nol maka $Z [k_1 k_2 k_3 k_4]$ sesuai dengan data *rule base* sebenarnya. Jika lebih dari satu tidak bernilai nol maka digunakan metode *weighted average*, sehingga Z didapatkan dengan rumus (7).

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{i=81} \mu_i Z_i}{\sum_{i=1}^{i=81} \mu_i} \quad (7)$$

dengan,

Z = Output perhitungan logika fuzzy

Z_i = Z masing-masing pada 81 *rule*

μ ke- i = Derajat keanggotan hasil proses dengan mencari nilai minimum pada masing-masing 81 *rule* yang ada

i = Jumlah rule pada *rule base* (81 aturan)

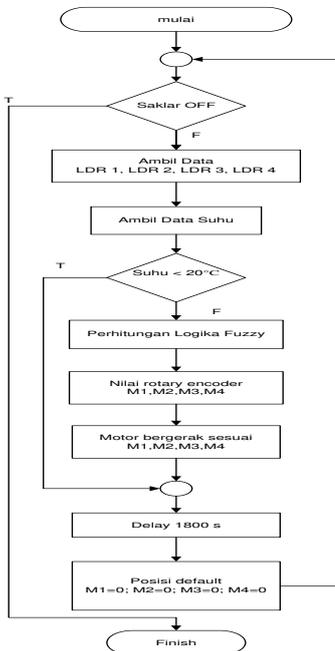
Perhitungan defuzzifikasi menggunakan metode *average weight* dari FIS Takagi-Sugeno.

$$Z = [Z1, Z2, Z3, Z4]$$

Hasil perhitungan menghasilkan 4 nilai Z akhir dimana nilai $Z1$ adalah jumlah perubahan sudut ke arah barat oleh motor 1, $Z2$ adalah perubahan sudut ke arah selatan oleh motor 2, $Z3$ adalah perubahan sudut ke arah timur oleh motor 1 dan $Z4$ adalah perubahan sudut ke arah utara oleh motor 2.

B. Perancangan Keseluruhan Sistem

Diagram alir keseluruhan proses sistem panel surya berpenjejak ditunjukkan dalam Gambar 9.



Gambar 9 Diagram Alir Keseluruhan Sistem

Sistem dirancang untuk aktif ketika saklar dihidupkan, kemudian mendeteksi suhu dan besar intensitas cahaya disekitar panel surya. Ketika suhu kurang dari 20°C sistem dirancang untuk menjadi tidak aktif dan tidak akan melakukan proses perhitungan logika fuzzy karena ini menandakan intensitas cahaya disekitar panel surya rendah sekali. Dan jika suhu diatas 20°C nilai LDR terdeteksi akan menjadi data LDR yang

akan diolah dalam perhitungan *logika fuzzy* yang kemudian akan digunakan untuk menentukan posisi panel surya, dan motor DC akan bergerak sesuai dengan hasil keputusan logika fuzzy untuk bergerak kea rah yang telah ditentukan. Proses pengambilan data dan pengolahan data dengan perhitungan logika fuzzy akan berulang setiap setengah jam.

III. HASIL RANCANGAN DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan perancangan sistem baik *hardware* maupun *software* alat, maka hasil rancangan alat pada penelitian ini ditunjukkan dalam Gambar 10.



Gambar 10 Bentuk Fisik Alat

Gambar 10 menunjukkan posisi panel surya pada saat diam (*default*) sebelum dilakukan proses pelacakan.

Untuk hasil perhitungan dengan logika fuzzy dan data LDR yang dicuplik dalam satu waktu tertentu akan ditampilkan dalam LCD yang telah disediakan pada alat. keempat nilai pembacaan LDR, suhu dan juga hasil perhitungan logika fuzzy ditunjukkan dalam tampilan LCD ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11 Tampilan LCD pada Alat

Gambar 11 menunjukkan data LDR yang dicuplik selama waktu tertentu kemudian diproses dalam perhitungan logika *fuzzy* menggunakan FIS Takagi-Sugeno dan menghasilkan keluaran berupa perubahan sudut yang disimbolkan dengan $Z1, Z2, Z3$ dan $Z4$. Data hasil perhitungan logika fuzzy diolah dalam mikrokontroler ATmega 128 yang kemudian berfungsi untuk menggerakkan motor DC sehingga posisi panel surya yang optimal dicapai. Nilai tegangan keluaran (V_{out}) sensor *solar cell* didapatkan setelah posisi mengalami perubahan dari posisi diam (*default*).

Sampel beberapa hasil perhitungan logika *fuzzy* dengan menggunakan beberapa data pembacaan LDR yang dicuplik dalam suatu waktu ditunjukkan pada Tabel I.

Tabel I menunjukkan beberapa data hasil pembacaan LDR dengan kondisi panel surya diam dan setelah proses tracking pada beberapa saat pencuplikan, serta nilai hasil pemrosesannya menggunakan perhitungan

logika fuzzy. Hasil pemrosesan disimbolkan dengan Z1 untuk motor 1 arah barat, Z2 untuk motor 2 arah selatan, Z3 untuk motor 1 arah timur dan Z4 adalah motor 2 arah utara, yang berturut-turut mewakili besar sudut pergerakan panel surya untuk mencapai posisi agar tegangan keluarannya dapat optimalnya.

TABEL I
SAMPLE PERHITUNGAN LOGIKA FUZZY

Jam	LDR (Diam) (Volt)	LDR (Tracking) (Volt)	Hasil Perhitungan Logika Fuzzy [Z1;Z2;Z3;Z4]
07.00	4,50	4,64	[18,36°;13,26°;20,82°;13,26°]
	4,52	4,65	
	4,63	4,76	
	4,50	4,67	
08.00	4,55	4,59	[14°; 15,12°; 24,76°; 11°]
	4,53	4,57	
	4,78	4,80	
	4,38	4,43	
09.00	4,77	4,84	[14°; 12,40°; 20°; 13,77°]
	4,78	4,82	
	4,84	4,90	
	4,75	4,81	
10.00	4,89	4,92	[12°; 9°; 15,80°; 9,50°]
	4,86	4,92	
	4,92	4,98	
	4,91	4,97	

Hasil pengujian didapatkan rata-rata peningkatan tegangan solar cell sebesar 0,40 volt setelah proses tracking dilakukan. Hasil pengujian ditunjukkan dalam Tabel II.

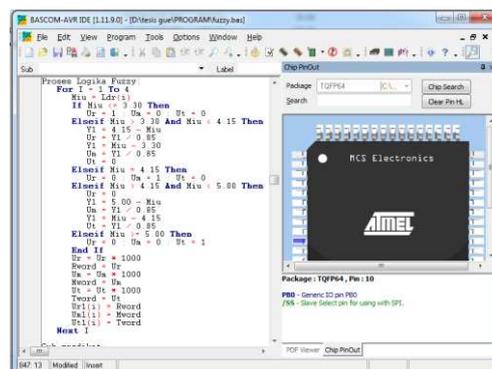
TABEL II
PERBANDINGAN V_{OUT} SENSOR SOLAR CELL
SEBELUM DAN SESUDAH TRACKING
DENGAN PERHITUNGAN LOGIKA FUZZY

Jam	Vout sensor solar cell (Diam)(Volt)	V_{out} sensor solar cell (Tracking)(Volt)	Selisih V_{out} (Volt)
07.00	18,60	19,33	0,73
07.30	18,90	19,34	0,44
08.00	19,10	19,43	0,33
08.30	19,12	19,48	0,36
09.00	19,45	19,87	0,42
09.30	19,74	19,99	0,25
10.00	19,72	20,52	0,80
10.30	20,66	20,88	0,22
11.00	20,70	20,89	0,19
11.30	20,72	20,91	0,19
12.00	20,79	20,97	0,18
12.30	20,92	21,01	0,09
13.00	20,70	21,30	0,60
13.30	19,69	20,89	0,20
14.00	19,88	20,44	0,56
14.30	19,62	20,30	0,68
15.00	19,54	19,90	0,36
15.30	19,52	19,89	0,37
16.00	18,96	19,59	0,63
Rata-rata Selisih V_{OUT}			0,40

Pengujian terhadap hasil rancangan dilakukan dengan membandingkan besar tegangan keluaran sensor solar cell dengan posisi panel surya diam tanpa dilakukan pelacakan dengan metode apapun dan terhadap tegangan keluaran sensor setelah dilakukan tracking berdasarkan hasil perhitungan logika fuzzy yang digunakan. Pegerakan motor DC untuk melakukan pelacakan hanya terjadi setelah didapatkan keputusan dari logika fuzzy dalam menentukan arah posisi panel surya, selain itu motor DC tidak akan melakukan

pelacakan.

Proses perhitungan logika fuzzy diolah dengan menggunakan pemrograman pada BASCOM-AVR yang pada alat ditanam dalam mikrokontroler ATMega 128, beberapa langkah perhitungan logika fuzzy dalam mikrokontroler ditunjukkan dalam Gambar 12. Gambar 12 menunjukkan proses perhitungan logika fuzzy saat melakukan perhitungan derajat keanggotaan masing-masing LDR. Pada proses selanjutnya dilakukan dengan mencari nilai minimum dari derajat keanggotaan berdasarkan rule base yang telah ditentukan dan mencari rata-rata hasil keluaran fuzzy, sehingga didapatkan nilai Z1, Z2, Z3, dan Z4 yang mewakili besar sudut pergerakan panel surya ke nilai optimalnya ke arah timur, utara, barat dan selatan.



Gambar 12 Tampilan Proses Perhitungan Logika Fuzzy.

Berikut adalah salah satu proses hasil akhir perhitungan logika fuzzy ditunjukkan dalam Gambar 13.

```

Uz(1) = Uz(1) + Sing79(1)
Uz(2) = Uz(2) + Sing79(2)
Uz(3) = Uz(3) + Sing79(3)
Uz(4) = Uz(4) + Sing79(4)

Uz(1) = Uz(1) + Sing80(1)
Uz(2) = Uz(2) + Sing80(2)
Uz(3) = Uz(3) + Sing80(3)
Uz(4) = Uz(4) + Sing80(4)

Uz(1) = Uz(1) + Sing81(1)
Uz(2) = Uz(2) + Sing81(2)
Uz(3) = Uz(3) + Sing81(3)
Uz(4) = Uz(4) + Sing81(4)

Sub_z:
Z(1) = Uz(1) / Utot
Z(2) = Uz(2) / Utot
Z(3) = Uz(3) / Utot
Z(4) = Uz(4) / Utot
For I = 1 To 4
  E_z(i) = Z(i)

```

Gambar 13 Proses Akhir Perhitungan Logika Fuzzy

Gambar 13 menunjukkan proses akhir atau proses defuzzifikasi untuk mendapatkan nilai Z1, Z2, Z3, dan Z4. Setelah nilai didapatkan motor DC akan bergerak sebesar nilai Z1, Z2, Z3 dan Z4 berupa perubahan sudut. Dengan proses arah pergerakan motor dimulai dari arah barat sebesar Z1, selatan sebesar Z2, timur sebesar Z3 dan utara sebesar Z4.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari analisis hasil penelitian pada artikel ini dapat disimpulkan bahwa perhitungan logika fuzzy menggunakan FIS Takagi-Sugeno dapat dimanfaatkan untuk menentukan posisi optimal panel surya. Posisi direpresentasikan dalam perubahan sudut panel surya dari posisi awal ke arah timur, utara, selatan dan

barat(*default*).

Implementasi perhitungan logika fuzzy pada sistem panel surya berpenjejak menghasilkan peningkatan rata-rata besar tegangan keluaran sensor *solar cell* sebesar 0,40V, dibandingkan jika tanpa menggunakan sistem optimasi posisi panel surya. Motor DC tidak akan melakukan pelacakan jika belum dilakukan pencuplikan data LDR dan kemudian proses perhitungan logika fuzzy mendapatkan hasil keputusan kearah mana panel surya akan bergerak. Untuk validasi sistem pada FIS Takagi-Sugeno juga dilakukan perhitungan dengan FIS Tsukamoto dan didapatkan perbedaan tegangan keluaran rata-rata sensor solar cell sebesar 0,001 Volt. Ini menunjukkan hasil perhitungan Takagi-Sugeno dapat digunakan untuk mengambil keputusan dalam menentukan posisi panel surya.

Dari analisis hasil penelitian dapat disampaikan juga bahwa besar dimensi panel surya sangat berpengaruh terhadap proses pelacakan, karena semakin besar dimensi dapat menyebabkan perubahan intensitas cahaya yang didapatkan oleh sensor LDR semakin besar. Sehingga, dapat disarankan untuk penelitian selanjutnya untuk dimensi yang lebih besar.

Penambahan parameter lain seperti kelembaban juga dapat membantu penambahan masukan agar perhitungan *fuzzy* dapat memberikan hasil yang lebih tepat dalam menentukan posisi panel surya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEA (International Energy Agency), *Renewable Energy Technologies*, OECD/IEA, 2012.
- [2] Chia-Yen Lee, Po-Cheng Chou, Che-Ming Chiang and Chiu-Feng Lin, "Sun Tracking Systems: A Review," *Sensors*, Sept 2009, pp. 3875-3890, doi: 10.3390/s90503875.
- [3] Agus Naba. *Belajar Cepat Fuzzy Logic menggunakan MATLAB*. Yogyakarta:Penerbit Andi. 2009:37-38
- [4] Sri Kusumadewi.. *Aplikasi Logika Fuzzy Untuk Pendukung Keputusan*. Yogyakarta: Penerbit GRAHA ILMU. 2005:70-76
- [5] Sebastian Same, Vorsic, Joze.. *Maximum Efficiency Trajectories of a Two-Axis Sun Tracking System Determined Considering System Consumption*. IEEE International Conference on Solar Systems, 2011, vol. 1, pp. 1054-1057.
- [6] Zhou Yan, Shu Jiaying. *Application of Fuzzy Logic Control Approach in A Microcontroller-Based Sun Tracking System*. IEEE, 2010 :page: 161-164.
- [7] Faris Septiawan, *Pengertian Sensor*, http://farisseptiawan.blogspot.com/2010_03_01_archive.html (diakses 11 Januari 2014).
- [8] *DC MOTOR AND PC-LINK USBE*. Science Journal Vol. 12 No. 1: 21-27.