

Jurnal *Rekayasa Elektrika*

VOLUME 15 NOMOR 1

April 2019

Substrate Integrated Waveguide Bandpass Filter dengan Complementary Split Ring Resonator	1-6
<i>Dian Widi Astuti, Muslim, dan Trya Agung Pahlevi</i>	
Grid SVM: Aplikasi Machine Learning dalam Pengolahan Data Akuakultur	7-17
<i>Oskar Natan, Agus Indra Gunawan, dan Bima Sena Bayu Dewantara</i>	
Implementasi Fuzzy Logic dan Trajectory pada Manipulator Mobile Robot Untuk Deteksi Kebocoran Gas	18-24
<i>R Rendyansyah, Aditya Putra Perdana Prasetyo, dan Kemahyanto Exaudi</i>	
Sistem Telemonitoring KWH Meter Menggunakan Modul Wi-Fi ESP8266 Berbasis Arduino Uno	25-33
<i>Hidayat Nur Isnianto, Muhammad Arrofiq, Rijeqi Rahmawati, dan Bagus Mulyo Tyoso</i>	
Modifikasi Fantom ORNL_MIRD untuk Kebutuhan Simulasi Monte Carlo Pasien Radioterapi Kanker Payudara Menggunakan MCNPX	34-39
<i>Layna Miska, Rini Safitri, Irwandi, dan Elin Yusibani</i>	
Desain Low-Cost Sistem Monitoring Pengukuran Potensi Tenaga Matahari dan Tenaga Angin	40-46
<i>Aries Jehan Tamamy, Zaenal Arifin, dan Amalia</i>	
Optimasi Penempatan dan Kapasitas PLTS on grid Pada Sistem Distribusi Radial Menggunakan Metode Algoritma Genetika Multi Konstrain	47-55
<i>Muammar Zainuddin dan Haditsah Annur</i>	
Perintah Kontrol Gerak Kursi Roda Elektrik Menggunakan Sensor Elektromiograf	56-60
<i>Arizal Mujibtamala Nanda Imron, Wahyu Muldayani, dan Sumardi</i>	
Identifikasi Tingkat Kematangan Kelapa Sawit Berbasis Pencitraan Termal	61-67
<i>Khusnul Azima, Khairul Munadi, Fitri Arnia, dan Maulisa Oktiana</i>	
Perancangan Sistem Panel Surya Terkendali dalam Dua Sumbu untuk Peningkatan Efisiensi Pembangkitan Energi Listrik	68-74
<i>Porman Pangaribuan, Erwin Susanto, dan Rinaldi Aditya Pratama</i>	

Substrate Integrated Waveguide Bandpass Filter dengan Complementary Split Ring Resonator

Dian Widi Astuti, Muslim, dan Trya Agung Pahlevi
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik
Universitas Mercu Buana
Meruya Selatan No 1, Jakarta Barat 11650
e-mail: dian.widiastuti@mercubuana.ac.id

Abstrak—Substrate integrated waveguide (SIW) merupakan teknik mengimplementasikan *waveguide* ke bahan mikrostrip yang dapat diaplikasikan pada filter, antena, *mixer*, *coupler*, dan lain sebagainya. Pengimplementasian SIW ke filter dapat mengatasi masalah reduksi ukuran dan tingginya *insertion loss* yang biasa terjadi pada filter konvensional. Sedangkan metoda *complementary split ring resonator* (CSRR) mengatasi masalah reduksi ukuran dan selektifitas pada filter konvensional, dengan demikian penggabungan keduanya dapat memberikan performansi filter menjadi lebih baik. Penelitian ini mengusulkan kedua metode tersebut dalam merealisasikan suatu *bandpass filter* dengan mempergunakan studi parameter. Rancangan *bandpass filter* bekerja pada frekuensi 3,4 – 4,6 GHz dengan nilai *insertion loss* 0,5 dB dan nilai return loss di atas 15 dB serta memiliki satu *transmission zeros* pada frekuensi 3,32 GHz. Sedangkan hasil pengukuran memberikan nilai *insertion loss* di bawah 3 dB dan *return loss* 6,5 dB.

Kata kunci: *bandpass filter, complementary split ring resonator, substrate integrated waveguide, filter mikrostrip*

Abstract— Substrate integrated waveguide (SIW) is a technique to implement waveguide into microstrip material that can be applied to filter, antenna, mixer, coupler, and so on. Implementation of SIW to filter can overcome the problem of size reduction and high insertion loss commonly used in conventional filter. While the complementary split ring resonator (CSRR) method overcomes the problem of size reduction and selectivity in conventional filters, thus combining the two can provide better filter performance. This research proposes both methods in realizing a bandpass filter by using parameter study. Bandpass filter design works on a frequency of 3.4 – 4.6 GHz with an insertion loss value of 0.5 dB and a return loss value above 15 dB and has one transmission zeros at the frequency of 3.32 GHz. While the measurement results provide insertion loss value below 3 dB and 6.5 dB return loss.

Keywords: *bandpass filter, complementary split ring resonator, substrate integrated waveguide, microstrip filter*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektroika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Saluran transmisi mikrostrip merupakan salah satu jenis saluran transmisi planar yang dapat dipakai sebagai aplikasi komponen gelombang mikro, millimeter, dan terahertz selain *triplane* dan saluran koplanar. Saluran transmisi mikrostrip merupakan sebuah substrat dielektrika dengan permitivitas dan ketebalan tertentu. Setidaknya pada saluran transmisi mikrostrip akan terdiri dari *strip* tembaga pada bagian atas, substrat dan lapisan ground pada bagian bawahnya.

Pembuatan saluran transmisi mikrostrip sendiri dapat dilakukan dengan cara photolithografi dan *etching* yaitu dengan melarutkan bahan kimia tertentu untuk membuang lapisan tembaga di bagian tertentu. Ada juga yang mempergunakan teknologi lapisan *film* yang tipis sampai tebal untuk pembuatan saluran transmisi mikrostrip. [1]. Sehingga pembuatan komponen gelombang mikro tersebut dinilai cukup mudah dan murah apabila diproduksi secara

banyak. Adapun komponen gelombang mikro yang dapat diaplikasikan pada saluran transmisi planar adalah kopler, transformator, percabangan, dan filter.

Salah satu jenis filter yang berfungsi melewatkan frekuensi pada batas bawah, f_1 sampai frekuensi batas atas, f_2 dinamakan dengan *bandpass filter* [2]. Selain itu terdapat juga *low pass filter* [3], *high pass filter*, *bandstop filter* [4], dan lain-lainnya, dimana kesemuanya diklasifikasikan berdasarkan fungsi dari filter tersebut. Permasalahan bercampurnya dua aplikasi frekuensi yang berdekatan atau yang lebih, dikenal dengan interferensi, sangat menjadi perhatian bagi penyedia layanan telekomunikasi berbasis tanpa kabel. Hal ini dikarenakan penyedia jasa layanan telekomunikasi tidak hanya memberikan jasa layanan dengan kapasitas besar tetapi harus juga memberikan kualitas layanan telekomunikasi yang bagus kepada setiap pelanggannya. Dengan demikian masalah interferensi harus dihilangkan, diperlukan suatu perangkat filter untuk memisahkan antara frekuensi yang ingin dipergunakan

dengan frekuensi yang ingin dibuang.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pembuatan filter dapat mempergunakan teknologi *waveguide* ataupun dengan mempergunakan teknologi mikrostrip. Filter dengan teknologi mikrostrip memiliki kelebihan dikarenakan bahan mikrostrip yang merupakan bahan *low profile* (kecil, ringan, dan tipis) sehingga lebih mudah pembuatannya dibandingkan dengan teknologi *waveguide*. Walaupun terkadang diperoleh nilai *insertion loss* yang lebih besar dibandingkan dengan teknologi *waveguide*, filter dengan teknologi mikrostrip tetap masih menjadi pilihan karena lebih murah jika difabrikasi dalam jumlah banyak.

Hal lain yang menjadi perhatian dalam merealisasikan suatu filter adalah ukurannya yang kecil atau padat sehingga tidak membutuhkan ruang besar saat disatukan dengan komponen lain seperti antenna ataupun amplifier. Salah satu cara meminiaturisasi filter adalah dengan mempergunakan metode *substrate integrated waveguide* (SIW) [5], [6] dimana penggunaan SIW juga memberikan suatu rancangan filter yang memiliki *insertion loss* yang kecil. Selain itu metode *defected ground structure* (DGS) [7], *half mode substrate integrated waveguide* (HMSIW) [8], [9] dan *complementary split ring resonator* (CSRR) pada filter SIW [10] dipercaya juga sebagai teknik untuk meminiaturisasi ukuran dari suatu filter.

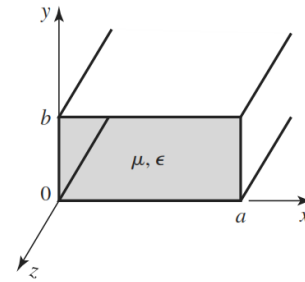
Masalah selektifitas dari suatu filter, dimana akan memberikan bentuk transmisi filter yang lebih ideal juga menjadi hal yang perlu diperhatikan dalam merancang suatu filter. Selektifitas dan miniaturisasi dari suatu filter dapat diperoleh dengan mempergunakan *complementary split ring resonator* (CSRR) pada filter SIW ataupun HMSIW [11]–[17] sehingga dapat menghasilkan *transmission zeros* dan miniaturisasi dari ukuran filter tersebut.

Pada penelitian ini akan merealisasikan sebuah bandpass filter dengan mempergunakan metode SIW CSRR dengan harapan bisa menghasilkan rancangan suatu filter yang memiliki nilai *insertion loss* yang kecil, ukuran yang kecil dan memiliki selektifitas yang bagus. Nilai *insertion loss* serta ukuran fisik filter yang kecil dapat diperoleh dengan mempergunakan metode SIW, sedangkan untuk menghasilkan selektifitas yang bagus dapat diperoleh dengan mempergunakan CSRR.

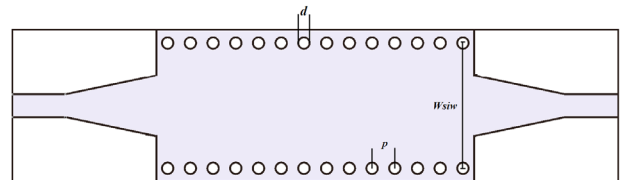
III. METODE

A. Substrate integrated waveguide

Substrate integrated *waveguide* filter sebenarnya merupakan pengaplikasian teknologi *waveguide* (Gambar 1) ke substrat mikrostrip. Pada *waveguide* frekuensi *cut-off*, f_c merupakan batasan frekuensi terkecil yang dapat merambat di dalam *waveguide*, yang dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut,



Gambar 1. Geometri dari *waveguide* segiempat [18]



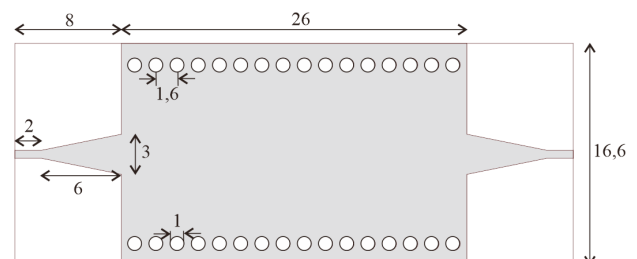
Gambar 2. Konfigurasi *substrate integrated waveguide*

$$f_c = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1)$$

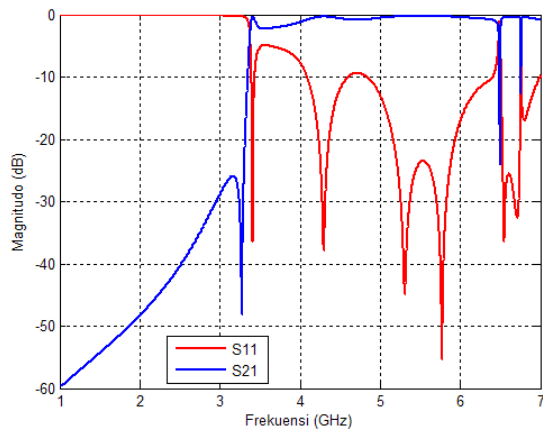
Penamaan m dan n merupakan mode-mode dari jumlah sinyal gelombang sinus setengah gelombang yang merambat pada arah sumbu x dan sumbu y di dalam *waveguide* segiempat tersebut. Mode-mode tersebut terbentuk dari medan listrik dan medan magnet di dalam *waveguide* tersebut, dengan demikian setiap *mode* akan memiliki frekuensi *cut-off* yang berbeda, [18].

Sedangkan struktur dari SIW terdiri atas dua barisan lubang-lubang yang tersusun secara paralel. Lubang-lubang tersebut berlapiskan konduktor sehingga menghubungkan lapisan konduktor lapisan atas dengan konduktor lapisan bawah. Gambar 2 memperlihatkan konfigurasi dari SIW. Lubang-lubang tersebut memiliki diameter, d dengan jarak antar pusat lubang terdekat, p , sehingga $d/p \geq 0,5$ harus terpenuhi agar mengurangi rugi-rugi energi yang keluar di antara lubang tersebut, [19].

Desain *bandpass filter* disimulasi dengan menggunakan simulator gelombang elektromagnetik Ansys HFSS. Serta pemilihan material substrat dengan nilai permitivitas besar ($\epsilon_r = 10,8$) dilakukan untuk memberikan miniaturisasi desain *bandpass filter* seperti yang telah dilakukan oleh [20]. Frekuensi *cut-off* pada SIW dapat diperoleh dari persamaan (1) dengan mempertimbangkan diameter lubang, $d = 1$ mm, jarak antar pusat lubang yang berdekatan,



Gambar 3. Desain frekuensi *cut-off* (satuan dalam mm)

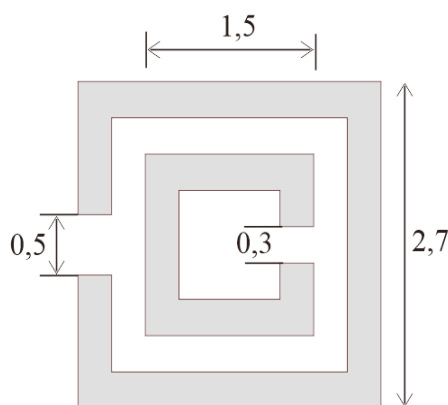
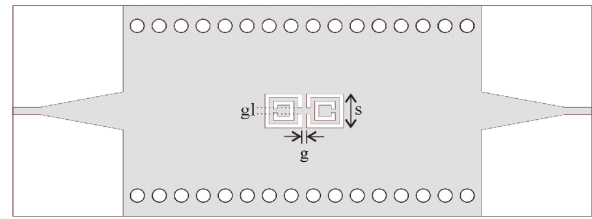
Gambar 4. Hasil simulasi frekuensi *cut-off*.

$p=1,6$ mm, maka diperoleh jarak paralel antar barisan lubang, $W_{SW}=13,4$ mm. Rancangan desain frekuensi *cut-off* diperlihatkan pada Gambar 3, dimana warna abu-abu adalah lapisan tembaga.

Sedangkan hasil simulasi frekuensi *cut-off* diperlihatkan pada Gambar 4. Pada Gambar 4 terlihat bahwa grafik faktor transmisi, S_{21} memberikan batas frekuensi terkecil yang dapat dilewati, yaitu 3,38 GHz dengan penurunan 3 dB. Sehingga desain ini dapat dipakai untuk desain *bandpass filter* pada daerah frekuensi 3,4 sampai 4,6 GHz. Karena frekuensi 3,4 GHz telah melebihi frekuensi terendah yang dapat dilewatkan.

B. Complementary Split Ring Resonator

Berawal dari *split ring resonator* (SRR) yang telah menarik perhatian komunitas peneliti di bidang elektromagnetik dan *microwave* dikarenakan aplikasi potensialnya di sintesis metamaterial dengan permeabilitas negatif yang efektif. Kemudian penelitian berkembang ke *complementary split ring resonator* (CSRR) yang pertama kali oleh Falcone et al [21] sebagai *resonator* metamaterial baru dan telah membuktikan memiliki pemitivitas negatif. Kemudian, karakteristik SRR dan CSRR termasuk model rangkaian ekuivalennya telah dipelajari dan dikembangkan secara intensif dimana SRR dianggap sebagai resonan

Gambar 5. Dimensi dari *complementary split ring resonator* (dimensi dalam satuan mm)

Gambar 6. Desain dua buah CSRR

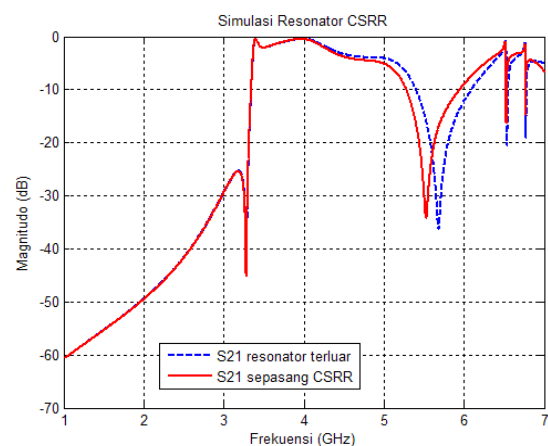
dipol magnetik yang dapat dieksitasi oleh medan magnet aksial, sedangkan CSRR menunjukkan perilaku sebagai resonan dipol elektrik, yang membutuhkan eksitasi medan listrik aksial. Aplikasi dari CSRR berkembang sebagai miniaturisasi perangkat planar gelombang mikro seperti filter, antenna, diplexer, dan *coupler*.

Complementary split ring resonator terdiri atas dua buah *square open loop resonator* dengan ukuran yang berbeda. *Square open loop resonator* dalam berukuran lebih kecil dibandingkan dengan *square open loop resonator* terluar, dengan arah gap yang saling berlawanan, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5.

Penambahan struktur CSRR bertujuan untuk mendapatkan desain *bandpass filter* yang lebih selektif dan *compact* pada desain *bandpass filter*. Pertama kali dilakukan penambahan *square open loop resonator* terluar terlebih dahulu pada desain frekuensi *cut-off* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6. Hal ini bertujuan melihat grafik transmisi atau S_{21} parameternya terlebih dahulu. Kemudian dilakukan penambahan *resonator* dalam. Gambar 6 memperlihatkan hasil simulasi sebelum dan sesudah penambahan *resonator* dalam dari *square open loop resonator* tersebut.

Pada Gambar 7 terlihat bahwa pemberian *resonator* luar dan dalam akan memberikan hasil wilayah *bandpass filter* yang lebih sempit dibandingkan dengan satu buah *square open loop resonator* terluar saja. Frekuensi *cut-off* tidak berpengaruh terhadap penambahan resonator dalam tersebut.

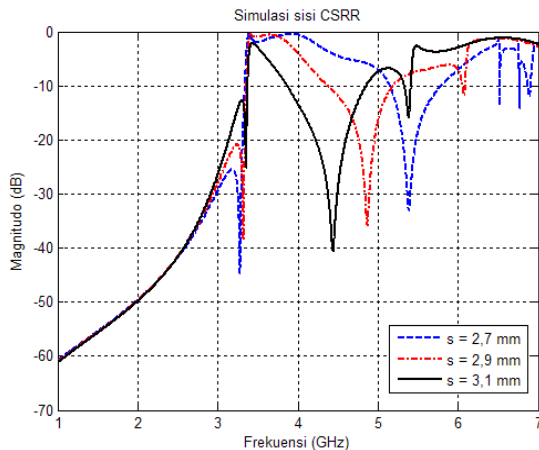
Kemudian dilakukan parameter studi terhadap panjang sisi, s dari CSRR. Pada Gambar 8 terlihat bahwa semakin besar sisi CSRR maka semakin sempit wilayah lolosnya, terlihat dari grafik S_{21} dengan $s=2,7$ mm yang berwarna



Gambar 7. Hasil simulasi dari pemberian resonator

Tabel 1. Hasil simulasi parameter s

s (mm)	Insertion loss (dB)	Bandwidth-3 dB (MHz)
2,7	1,99	940
2,9	1,04	570
3,1	2,12	110

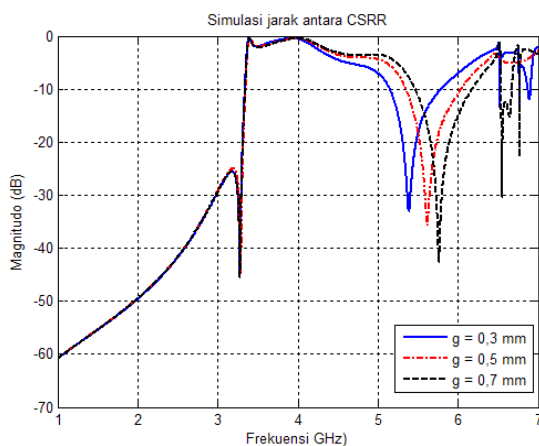


Gambar 8. Hasil simulasi jarak panjang sisi CSRR

biru ke grafik S_{21} dengan $s=3,1$ mm, yang berwarna hitam. Hal yang sama juga terjadi pada kebalikannya. Adapun hasil simulasi parameter s diperlihatkan pada Tabel 1.

Kemudian dilakukan parameter studi terhadap parameter jarak antara dua buah CSRR, g . Pada Gambar 9 memperlihatkan hasil simulasi dengan penambahan sepasang CSRR. Pada Gambar terlihat terjadi penurunan grafik faktor transmisi di frekuensi 5,3870 GHz, untuk $g=0,3$ mm sehingga dapat disimpulkan semakin jauh jarak antara CSRR maka akan semakin lebar *bandwidth* yang akan dihasilkan dari bandpass filter. Perubahan nilai parameter g tersebut tidak memiliki pengaruh pada frekuensi *cut-off* dari *bandpass filter*. Sedangkan rangkuman pergeseran parameter g diperlihatkan pada Tabel 2.

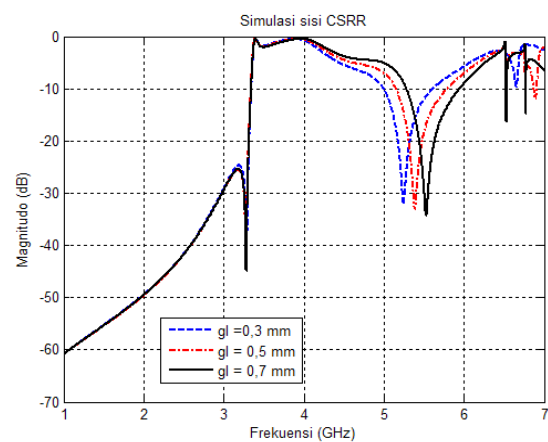
Parameter studi juga dilakukan pada variabel gap pada

Gambar 9. S_{21} parameter terhadap perubahan variabel d Tabel 2. Hasil simulasi parameter g

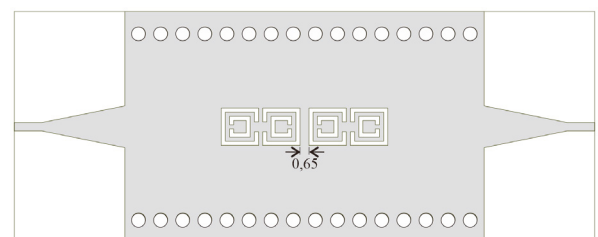
g (mm)	Insertion loss (dB)	Bandwidth-3 dB (MHz)
0,3	1,98	940
0,5	2,06	1020
0,7	2,22	1090

Tabel 3. Hasil simulasi parameter gl

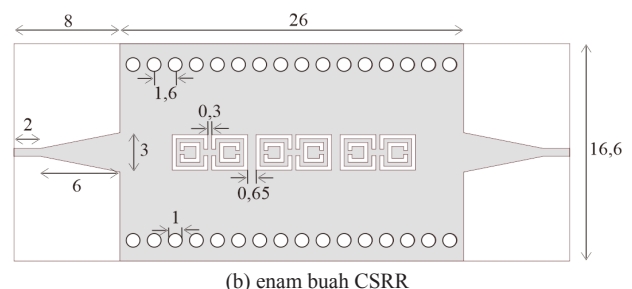
gl (mm)	Insertion loss (dB)	Bandwidth -3 dB (MHz)
0,3	1,83	870
0,5	1,98	940
0,7	2,00	1000

Gambar 10. S_{21} parameter terhadap perubahan variabel gl

square open loop resonator terluar, gl . Hasil simulasi terhadap perubahan parameter *gap* pada *resonator* terluar diperlihatkan pada Gambar 10. Pada Gambar 10 terlihat semakin besar nilai gap terluar maka akan semakin lebar wilayah lolos yang diberikan. Hal ini diperlihatkan dengan perubahan dari nilai $gl=0,3$ mm ke nilai $gl=0,7$ mm. Begitu juga dengan sebaliknya. Tabel 3 memperlihatkan hasil

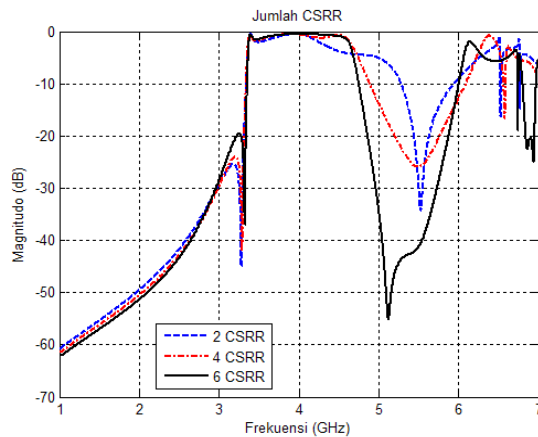


(a) empat buah CSRR



(b) enam buah CSRR

Gambar 11. Desain *bandpass filter* dengan empat dan enam buah CSRR



Gambar 12. Hasil simulasi S_{21} parameter dari desain *bandpass filter* dengan empat dan enam buah CSRR

simulasi dari parameter g_l .

C. Jumlah Complementary Split Ring Resonator

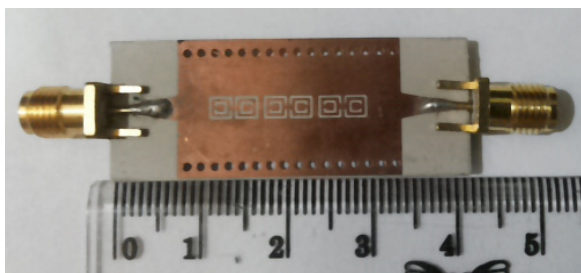
Sepasang CSRR ternyata belum dapat memberikan karakteristik filter yang selektif, sehingga dilakukan penambahan sepasang CSRR secara sejajar hingga jumlah CSRR tersebut menjadi 4 dan 6 buah seperti yang diperlihatkan pada Gambar 11.

Hasil simulasi dari desain Gambar 11 diperlihatkan pada Gambar 12. Pada Gambar 12 terlihat bahwa penambahan 4 buah pasang CSRR dari yang sebelumnya hanya berjumlah 2 buah pasang CSRR menjadikan filter tersebut menjadi lebih selektif. Selain itu penambahan CSRR memberikan *bandwidth* yang lebih sempit, berkurang sekitar 500 MHz dari sebelumnya.

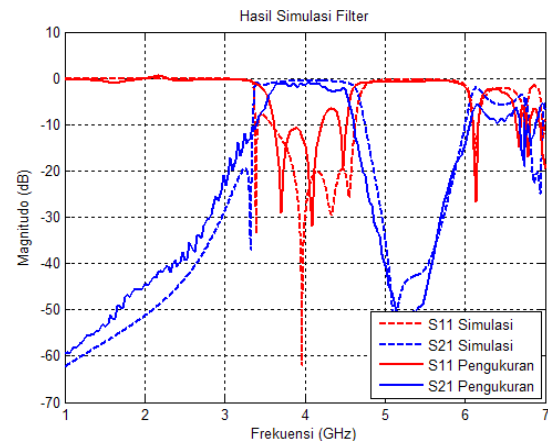
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah mendapatkan S parameter yang dinilai bagus, maka dilakukanlah fabrikasi terhadap rancangan SIW *bandpass filter* CSRR. Gambar 13 memperlihatkan hasil fabrikasi dari rancangan *bandpass filter* dengan mempergunakan enam buah CSRR. Adapun material yang dipergunakan adalah RO 3210 dengan ketebalan 0,64 mm dan $\tan \delta$ 0,0027.

Kemudian dilakukan validasi dari fabrikasi dengan mempergunakan *Vector Network Analyzer*, untuk mengukur *insertion loss* dan *reflection loss*. Gambar 14 memperlihatkan perbandingan antara hasil simulasi



Gambar 13. Fabrikasi dari *bandpass filter* dengan enam buah CSRR



Gambar 14. Perbandingan antara hasil simulasi dengan hasil pengukuran *bandpass filter* dengan enam buah CSRR

dengan hasil pengukuran. Hasil simulasi diberikan berupa garis putus-putus sedangkan hasil pengukuran diperlihatkan dengan garis utuh.

Pada simulasi memperlihatkan bahwa rancangan *bandpass filter* tersebut bekerja pada frekuensi 3,4 GHz sampai 4,58 GHz dengan nilai *insertion loss* terbesar 1,57 dB pada frekuensi 3,46 GHz. Pada hasil pengukuran memperlihatkan *bandwidth* 3 dB yang diperoleh lebih kecil, yaitu dari 3,58 GHz sampai 4,515 GHz. Walaupun demikian *insertion loss* tersebut masih berada di bawah 3 dB. Hasil pengukuran juga memperlihatkan penurunan terhadap nilai *return loss*, dari di bawah 20 dB menjadi 6,483 dB.

Perbedaan antara hasil simulasi dengan pengukuran kemungkinan dikarenakan ketidakcocokan dalam memberikan *boundaries* pada simulasi. Hasil pengukuran juga memberikan pergeseran *bandwidth* lebih kecil yaitu sekitar hampir 300 MHz. Pada hasil simulasi memperlihatkan adanya *transmission zeros* di awal frekuensi *cut-off*. Akan tetapi di saat pengukuran, tidak diperoleh *transmission zeros* sama sekali.

V. KESIMPULAN

Realisasi filter dengan mempergunakan teknik *substrate integrated waveguide* (SIW) dan *complementary split ring resonator* (CSRR) dapat memberikan ukuran filter yang lebih kecil dan selektif daripada filter konvensional. Hasil pengukuran memberikan nilai *insertion loss* di bawah 3 dB dan *return loss* di atas 6,5 dB. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut agar realisasi *bandpass filter* tersebut memiliki *bandstop* yang luas sehingga tidak terjadi frekuensi resonansi yang berdekatan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia atas dukungan dan pendanaan penelitian ini pada skema PDUPT (2019).

REFERENSI

- [1] M. Alaydrus, Saluran Transmisi Telekomunikasi. Graha Ilmu, 2009.
- [2] M. Alaydrus, "Designing microstrip bandpass filter at 3.2 GHz," *Int. J. Electr. Eng. Informatics*, vol. 2, no. 2, pp. 71–83, 2010.
- [3] D. W. Astuti, "Prototipe Lowpass Filter Stepped Impedance Pada UMTS Untuk Sistem Rectenna," *J. Tek. Elektro Univ. Tarumanagara, TESLA*, vol. 17, no. 1, pp. 101–113, 2015.
- [4] D. W. Astuti, F. Yansyah, and M. Alaydrus, "Bandstop Filter for Radar Application with L Resonator," in *ICNERE*, 2016, no. 1, pp. 3–6.
- [5] R. Wang, L. Wu, and X. Zhou, "Compact Folded Substrate Integrated Waveguide Cavities And Bandpass Filter," *Prog. Electromagn. Res.*, pp. 135–147, 2008.
- [6] D. Deslandes and K. Wu, "Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 6, pp. 2516–2526, 2006.
- [7] Y. Huang, Z. Shao, and L. Liu, "A Substrate Integrated Waveguide Bandpass Filter Using Novel Defected Ground Structure Shape," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 135, no. December, pp. 201–213, 2013.
- [8] Y. Wang et al., "Half mode substrate integrated waveguide (HMSIW) bandpass filter," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 17, no. 4, pp. 265–267, 2007.
- [9] Y. D. Dong, T. Itoh, and L. Angeles, "Composite Right/Left-Handed Substrate Integrated Waveguide and Half-Mode Substrate Integrated Waveguide," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2009, pp. 49–52.
- [10] Y. D. Dong, T. Yang, and T. Itoh, "Substrate integrated waveguide loaded by complementary split-ring resonators and its applications to miniaturized waveguide filters," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 57, no. 9, pp. 2211–2223, 2009.
- [11] A. R. Azad and A. Mohan, "Sixteenth-mode substrate integrated waveguide bandpass filter loaded with complementary split-ring resonator," *Electron. Lett.*, vol. 56, no. 9, pp. 546–547, 2017.
- [12] L. Qiang, "A Compact UWB HMSIW Bandpass Filter Based On Complementary Split-Ring Resonators," *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 11, pp. 237–243, 2009.
- [13] H. Zhang, W. Kang, and W. Wu, "Differential substrate integrated waveguide bandpass filter with improved common-mode suppression utilising complementary split-ring resonators," *Electron. Lett.*, vol. 53, no. 7, pp. 508–510, 2017.
- [14] P. In, "Evanescence-Mode Substrate Integrated Waveguide (SIW) Filters Implemented with Complementary Split Ring Resonators," vol. 111, no. December 2010, pp. 419–432, 2011.
- [15] Q. L. Zhang, W. Y. Yin, S. He, and L. S. Wu, "Compact substrate integrated waveguide (SIW) bandpass filter with complementary split-ring resonators (CSRRLs)," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 20, no. 8, pp. 426–428, 2010.
- [16] X.-C. Zhang, Z.-Y. Yu, and J. Xu, "Novel Band-Pass Substrate Integrated Waveguide (SIW) Filter Based on Complementary Split Ring Resonators (CSRRL)," *Prog. Electromagn. Res. PIER*, vol. 72, pp. 39–46, 2007.
- [17] A. Danideh and R. A. Sadeghzadeh, "Miniaturized Substrate Integrated Waveguide Filter With Complementary Spiral Resonator," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 53, no. 6, pp. 1308–1311, 2011.
- [18] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Wiley, 2012.
- [19] F. X. and K. Wu, "Guided-wave and leakage characteristics of sub- strate integrated waveguide," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 5, pp. 66–73, 2005.
- [20] D. W. Astuti, A. Jubaidilah, and M. Alaydrus, "Substrate integrated waveguide bandpass filter for VSAT downlink," in *QiR 2017 - 2017 15th International Conference on Quality in Research (QiR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering*, 2017, vol. 2017–Decem, pp. 101–105.
- [21] F. Falcone et al., "Effective Negative-epsilon Stopband Microstrip Lines Based on Complementary Split Ring Resonators," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 14, no. 6, pp. 280–282, 2004.

Grid SVM: Aplikasi Machine Learning dalam Pengolahan Data Akuakultur

Oskar Natan, Agus Indra Gunawan, dan Bima Sena Bayu Dewantara
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Kampus PENS, Jalan Raya ITS Sukolilo, Surabaya 60111
e-mail: theoskarnatan@gmail.com

Abstrak—Kondisi air merupakan faktor utama yang mempengaruhi tingkat kesuksesan dalam akuakultur khususnya pada budidaya udang. Akan tetapi, petani sering mengalami kesulitan dalam menentukan kondisi tersebut yang didasarkan pada hasil pengukuran berbagai parameter air. Oleh karena itu, diperlukan sebuah model klasifikasi yang tepat untuk membantu petani dalam mengklasifikasi kondisi air di tambak. Dengan mengetahui kondisi tersebut, maka *treatment* yang tepat dan sesuai dapat diberikan. Pada penelitian ini, algoritma *machine learning* bernama *support vector machine* (SVM) digunakan untuk membuat model dari sebuah dataset akuakultur. Teknik pemrosesan lain seperti normalisasi data dan penggunaan algoritma optimasi bernama *grid search* juga dilakukan untuk meningkatkan hasil pemodelan. Selanjutnya, sebuah skema pengujian dengan *k-fold cross validation* dilakukan untuk mengetahui performa dari model yang diukur berdasarkan nilai akurasi, presisi, *recall*, *f-measure*, dan *area under receiver operating characteristic curve* (AUROC). Kemudian, model dari SVM ini dibandingkan dengan model yang dibentuk dengan algoritma yang lain yaitu *K-nearest neighbor* (KNN), *random forest* (RF), *logistic regression* (LR), *complement naive bayes* (CNB), dan *multi-layer perceptron* (MLP) guna mengetahui model yang paling bagus untuk diimplementasikan pada proses budidaya. Dari hasil percobaan, model yang dibentuk dengan SVM dan optimasi *grid search* memiliki performa paling tinggi saat proses validasi dengan skor performa keseluruhan sebesar 3,54383.

Kata kunci: *machine learning, SVM, grid search, akuakultur*

Abstract—Water condition is the main factor that affects the success rate of aquaculture, especially in shrimp cultivation. However, the farmer often experiences difficulties in determining the condition which is stated based on the measurement of various water parameter. Therefore, a proper classification model is needed to help the farmer in classifying the water condition in a pond. By knowing the condition, then proper and correct treatment can be given. In this research, a machine learning algorithm called SVM is used to make a model from an aquaculture dataset. Another processing technique like data normalization and the usage of optimization algorithm named *grid search* is also performed to improve the modeling result. Furthermore, a test scheme with using *k-fold cross-validation* is performed to know the performance of the model which is measured by the value of accuracy, precision, *recall*, *f-measure*, and AUROC. Then, the SVM model is compared with several models which are made by using another machine learning algorithm such as KNN, CNB, RF, MLP, and LR in order to know the best model to be implemented on cultivation process. From the experiment results, the model which is made with SVM and *grid search* optimization has the best performance in the validation process with the performance score of 3.54383.

Keywords: *machine Learning, SVM, grid search, aquaculture*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Dalam dunia akuakultur, terdapat banyak faktor yang mempengaruhi kesuksesan dalam berbudidaya, khususnya pada budidaya udang. Salah satu faktor yang paling berpengaruh dalam budidaya perairan adalah kondisi air tambak yang menjadi habitat bagi tumbuh-kembang udang. Selain berpengaruh terhadap perkembangan udang, kondisi air juga menentukan tingkat *survival rate* udang. Hal ini dikarenakan udang sangat rentan terserang penyakit apabila kondisi air tambak di bawah kondisi standar untuk budidaya [1]. Oleh karena itu, mengetahui kondisi air tambak merupakan hal yang wajib bagi para petani. Akan

tetapi, salah satu tantangan dari penentuan kondisi air tambak adalah pertimbangan terhadap berbagai parameter air yang cukup banyak. Selain itu, nilai parameter air seperti pH dan kadar oksigen terlarut cenderung untuk tidak berubah secara signifikan ketika kondisi air berubah dari baik ke buruk atau sebaliknya [2]. Bahkan kondisi air juga bisa dikatakan buruk meskipun beberapa parameter air dalam kondisi yang normal atau masih dalam batas aman untuk budidaya. Dengan demikian, petani sering mengalami kesulitan dalam mengklasifikasi kondisi air tambak berdasarkan pengukuran terhadap beberapa parameter air. Hal ini bisa menjadi sangat berbahaya jika petani salah mengambil tindakan atau salah melakukan

treatment pada tambak mereka.

Berdasarkan paparan permasalahan dan tantangan tersebut, maka diperlukan sebuah model klasifikasi yang dapat membantu petani dalam mengklasifikasi kondisi air tambak. Model ini bekerja dengan mengestimasi kondisi air berdasarkan input pembacaan parameter air. Dengan kata lain, model klasifikasi ini memproses berbagai input data berupa data-data pengukuran parameter air tambak dan menghasilkan output berupa estimasi klasifikasi dari kondisi air tambak tersebut. Adapun parameter-parameter air yang diperhitungkan dalam pemrosesan adalah pH, alkalinitas, *dissolved oxygen* (DO), *total organic matter* (TOM), NH_4 , NH_3 , NO_2 , NO_3 , PO_4 , *NP ratio*, salinitas, transparansi air, dan tinggi air. Dengan adanya bantuan dalam hal klasifikasi ini, diharapkan petani dapat mengambil tindakan atau *treatment* yang tepat untuk tambak mereka. Dengan demikian, yang menjadi tantangan dalam penelitian ini adalah bagaimana cara membentuk model klasifikasi yang bagus untuk digunakan oleh para petani udang.

Terkait dengan pembuatan model klasifikasi tersebut, pada penelitian ini diajukan sebuah algoritma *machine learning* bernama SVM untuk membuat model dari sebuah dataset akuakultur. Selain itu, beberapa teknik dalam *data preprocessing* juga diaplikasikan untuk mengolah data terlebih dahulu sebelum dimodelkan. SVM memiliki beberapa parameter yang menentukan seberapa baik algoritma tersebut bekerja. Oleh karena itu, pada penelitian ini juga digunakan sebuah algoritma optimasi yang disebut dengan *grid search* untuk *men-tuning* parameter-parameter yang ada pada SVM. Sebagai evaluasi tambahan, model yang dibentuk SVM ini juga dibandingkan dengan model yang dibentuk dari algoritma *machine learning* yang lain untuk menentukan model mana yang paling bagus. Sebuah model dikatakan bagus apabila model tersebut memiliki performa yang baik saat diuji pada sebuah dataset pengujian. Adapun parameter performa yang digunakan untuk mengukur seberapa baik suatu model klasifikasi adalah nilai akurasi, presisi, *recall*, *f-measure* dan luasan AUROC yang akan dijelaskan pada bab berikutnya. Dari berbagai penjelasan di atas, maka keterbaruan dari penelitian ini adalah studi analisa tentang penggunaan teknik *data preprocessing*, algoritma *machine learning*, dan algoritma optimasi dalam pembuatan model klasifikasi air tambak pada bidang akuakultur khususnya untuk budidaya udang.

SVM telah digunakan dalam beberapa penelitian untuk membuat model estimasi atau klasifikasi dari suatu data. Pada [3], model SVM digunakan untuk memprediksi atau mengestimasi suhu dari *multicore processors* berdasarkan jumlah konsumsi daya selama beroperasi. Selain itu, SVM juga dapat diaplikasikan pada klasifikasi gambar seperti yang dilakukan dalam penelitian [4]. Penelitian terkait dengan optimasi SVM juga dilakukan pada [5] dan diaplikasikan untuk diagnosa medis. Sementara pada penelitian ini, SVM digunakan untuk memprediksi kondisi air tambak berdasarkan beberapa input nilai parameter air. Adapun kernel SVM yang dipakai dalam penelitian ini adalah kernel *radial basis function* (RBF) dan dioptimasi

dengan algoritma *grid search* untuk menemukan nilai c dan γ paling optimal. Untuk meningkatkan performa pemodelan data, teknik *data preprocessing* seperti normalisasi juga diaplikasikan dan dievaluasi.

II. STUDI PUSTAKA

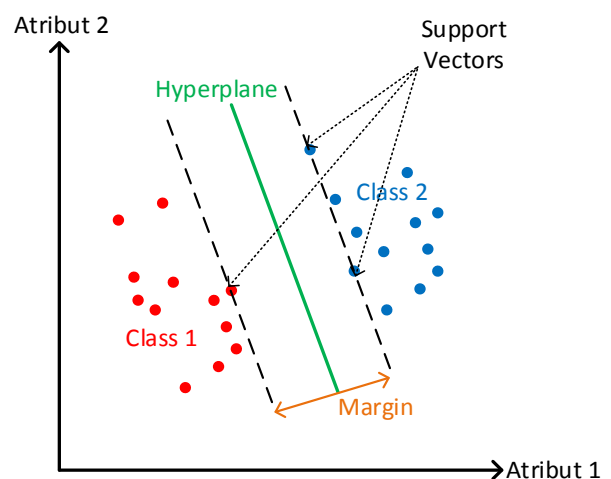
Seperti yang dijelaskan pada bab sebelumnya, pada penelitian ini digunakan sebuah algoritma *machine learning* yaitu *support vector machine* (SVM) untuk membentuk model klasifikasi dari dataset akuakultur dalam kasus *supervised learning*. SVM membentuk model klasifikasi dengan menemukan *hyperplane* yang bisa memaksimalkan margin dari 2 buah *class* dalam dataset [6]. Ilustrasi dari *hyperplane* yang memisahkan 2 buah *class* dalam data dapat dilihat pada Gambar 1.

Titik-titik warna merah dan biru adalah plot dari sampel data berdasarkan nilai atribut 1 dan atribut 2 dengan warna berbeda untuk masing-masing *class*. Kedua *class* ini dipisahkan oleh garis *hyperplane* berwarna hijau yang letaknya tepat di tengah margin. Lebar margin ini bergantung dari letak *support vectors* yang tidak lain adalah sampel yang letaknya paling berdekatan di antara 2 *class*. Dengan menggunakan konsep ini, SVM juga bisa diimplementasikan untuk dataset berdimensi tinggi (memiliki *feature vectors* yang banyak) atau dataset yang memiliki lebih dari 2 atribut. Pada contoh ilustrasi dalam Gambar 1, fungsi untuk membentuk garis *hyperplane* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan garis lurus seperti pada Persamaan (1),

$$y = mx + c, \quad (1)$$

dimana y adalah fungsi garis x , nilai atribut sampel, m koefisien *gradient* garis, dan koefisien bias garis.

Akan tetapi dalam permasalahan sebenarnya, data seringkali tidak mengelompok sesuai dengan *class*-nya dengan teratur sehingga sebuah garis lurus tidak bisa memisahkan 2 buah *class* dengan baik. Oleh karena itu, dibuatlah sebuah kernel untuk membentuk garis yang bisa melengkung-lengkung sesuai dengan sebaran data yang ada. Salah satu kernel SVM yang digunakan dalam



Gambar 1. Plot data dan *hyperplane* SVM

Tabel 1. *Cartesian product* pada *grid search*

Himpunan (Parameter)	γ			
c	Anggota Himpunan	j_1	j_2	j_n
	i_1	(i_1, j_1)	(i_1, j_2)	(i_1, j_n)
	i_2	(i_2, j_1)	(i_2, j_2)	(i_2, j_n)
	i_n	(i_n, j_1)	(i_n, j_2)	(i_n, j_n)

penelitian ini adalah kernel RBF [7]. Adapun fungsi kernel tersebut dapat dilihat seperti pada Persamaan (2) dan Persamaan (3).

$$y = k(x_1, x_2) + c, \quad (2)$$

$$k(x_1, x_2) = \exp\left(-\gamma \|x_1 - x_2\|^2\right), \quad (3)$$

dimana k adalah fungsi kernel RBF, x_1 nilai atribut (*feature vectors*) sampel 1, x_2 nilai atribut (*feature vectors*) sampel 2, γ koefisien gamma, c koefisien bias garis *hyperplane*, dan adalah kuadrat jarak *Euclidean* dari 2 nilai atribut dari kedua sampel.

Dari Persamaan (2) dan Persamaan (3), telah diketahui bahwa terdapat 2 buah parameter yang perlu di-*tuning* untuk menghasilkan garis *hyperplane* yang paling optimal yaitu koefisien c dan γ . Nilai c digunakan untuk kompensasi terhadap garis *hyperplane* SVM agar berada pada posisi yang tepat dalam memisahkan 2 buah *class* atau lebih. Sementara nilai γ dapat diibaratkan sebagai faktor pengali untuk jarak dari 2 buah sampel. Untuk mendapatkan nilai yang tepat atau optimal untuk kedua koefisien tersebut, maka diperlukan sebuah algoritma optimasi. Pada penelitian ini sebuah algoritma bernama *grid search* digunakan untuk menemukan nilai yang tepat untuk mengisi koefisien c dan γ . *Grid search* bekerja dengan mencacah nilai dalam batasan *range* tertentu lalu menginputkan segala kombinasi angka yang dimungkinkan untuk mengisi nilai c dan γ [8]. Sebagai contoh, dalam sebuah percobaan dibuat *range* nilai 1 sampai 200 untuk parameter c dan 0,01 sampai 1 untuk parameter γ . Kemudian masing-masing nilai dicacah setiap 1 dan 0,01 sehingga himpunan nilai untuk c adalah $\{1, 2, 3, \dots, 200\}$ dan γ adalah $\{0,01, 0,02, 0,03, \dots, 1\}$. Masing-masing himpunan memiliki 200 dan 100 anggota nilai, sehingga jumlah kombinasi yang dapat dibuat adalah 20000 kombinasi. Kombinasi angka yang menghasilkan performa terbaiklah yang dipilih untuk menjadi nilai dari kedua koefisien tersebut. Secara garis besar, *grid search* adalah fungsi *cartesian product* seperti pada Persamaan (4).

$$c \cdot \gamma = \{(i, j) | i \in c \text{ dan } j \in \gamma\}, \quad (4)$$

dimana i anggota dari himpunan c , j anggota dari himpunan γ . Adapun ilustrasi pencacahan nilai dan *cartesian product* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 2. Spesifikasi dataset akuakultur

Spesifikasi	
Jenis Permasalahan	Klasifikasi
Jumlah Atribut Input	13
Jumlah Atribut Output	1 (<i>Class</i>)
Jumlah Sampel	174
Tipe Data	<i>Binomial</i> dan Bilangan
<i>Missing Value</i>	Ya

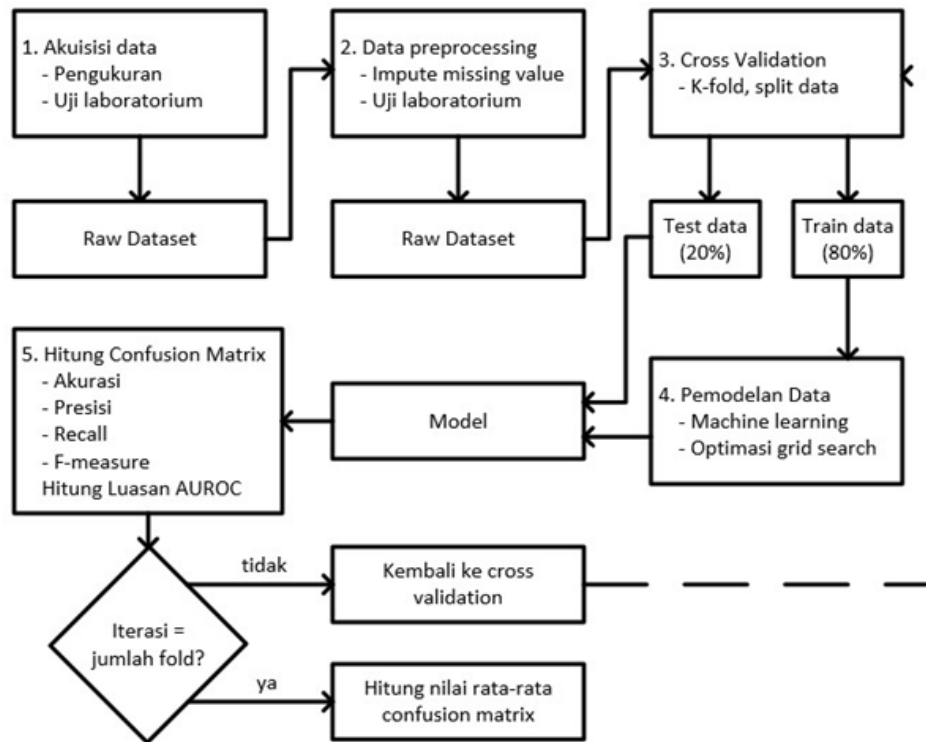
III. METODE

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan model terbaik untuk klasifikasi kondisi air tambak. Oleh karena itu, dilakukan evaluasi performa pada berbagai macam algoritma *machine learning* dalam proses pemodelan data akuakultur. Untuk mendapatkan hasil yang optimal maka diperlukan beberapa tahapan mulai dari proses pengambilan data hingga proses pemodelan data. Pada bab ini dijelaskan bagaimana penelitian dilakukan dan penjelasan secara detail pada setiap tahapan penelitian. Adapun proses akuisisi hingga pemodelan data dan validasi model *machine learning* dapat diringkas sesuai dengan blok diagram pada Gambar 2.

A. Dataset

Dalam persoalan *supervised learning* maka diperlukan sebuah dataset untuk dimodelkan dengan suatu algoritma *machine learning* tertentu. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan sebuah dataset akuakultur yang diakuisisi dari beberapa tambak udang Vannamei di daerah Bulukumba, Sulawesi Selatan. Adapun spesifikasi dari dataset ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Data ini berisi tentang kondisi air tambak berdasarkan hasil pengukuran 13 parameter air (atribut input). Seperti yang dijelaskan pada bab sebelumnya, parameter-parameter tersebut meliputi pH, alkalinitas, DO, TOM, NH_4 , NH_3 , NO_2 , NO_3 , PO_4 , *NP ratio*, salinitas, transparansi air, dan tinggi air. Pengukuran parameter-parameter air ini dilakukan dengan menggunakan sensor untuk besaran fisis dan juga berdasarkan hasil uji lab untuk zat-zat kimia tertentu. Pada pengambilan data parameter fisis air, sensor air dicelupkan langsung ke dalam tambak. Sementara untuk mengukur bahan kimia terlarut, pengukuran dilakukan dengan mengambil sampel air dan dibawa ke laboratorium. Sedangkan untuk kondisi air tambak (atribut output) diklasifikasikan menjadi 2 kategori yaitu kondisi baik (1) dan buruk (0). Adapun pelabelan klasifikasi kondisi air tambak ini didasarkan pada justifikasi para *expert* di bidang akuakultur yang menilai kondisi tambak secara langsung. Data diakuisisi dari 14 tambak yang berada dalam 1 wilayah yang sama selama proses budidaya udang berlangsung. Pengambilan data dilakukan setiap hari sehingga didapatkan sampel data 174 sampel. Pada dataset ini juga terdapat beberapa data *missing* yang disebabkan kerusakan sensor maupun *human error*.

Gambar 2. Diagram proses pemodelan *machine learning*

Tabel 3. Penjelasan parameter air tambak

No.	Parameter	Penjelasan	Satuan / Range
1	PH	Kadar PH dalam air tambak	0 – 14
2	Alkalinitas	Jumlah HCO ₃ (Bikarbonat) dan CO ₃ (Karbonat)	part per million (ppm)
3	DO	Jumlah Oksigen terlarut dalam air	(ppm)
4	TOM	Total organic matter dalam air	(ppm)
5	NH ₄	Jumlah ammonium dalam air	(ppm)
6	NH ₃	Jumlah ammonia dalam air	(ppm)
7	NO ₂	Jumlah nitrogen dioksida dalam air	(ppm)
8	NO ₃	Jumlah nitrat dalam air	(ppm)
9	PO ₄	Jumlah fosfat dalam air	(ppm)
10	NP Ratio	Ratio nitrat dan fosfat dalam air	-
11	Salinitas	Tingkat keasinan air	part per thousand (ppt)
12	Transparansi Air	Jarak pandang air dari permukaan tambak	centimeter (cm)
13	Tinggi Air	Ketinggian air tambak	(cm)
14	Kondisi Air	Klasifikasi kondisi air tambak	baik (1) dan buruk (0)

Adapun penjelasan untuk setiap parameter air tambak dalam atribut input dan atribut output pada data akuakultur tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.

B. Data Preprocessing

Seperti dijelaskan pada sub bab sebelumnya, dataset yang digunakan dalam penelitian ini terdapat *missing value* di beberapa sampel. Selain itu masing-masing atribut juga memiliki sebaran nilai yang berbeda. Jika kedua hal tersebut diabaikan, maka akan mengakibatkan buruknya hasil pemodelan data [9]. Oleh karena itu, diperlukan suatu

teknik *preprocessing* untuk mengisi nilai yang *missing* dan menyamakan sebaran nilai data pada setiap atribut. Secara umum, tujuan dari implementasi *preprocessing* adalah untuk mempersiapkan dataset sebelum diproses lebih lanjut dengan algoritma *machine learning*. Pada penelitian ini digunakan teknik *averaging* dimana nilai yang ada pada suatu atribut dirata-rata untuk mengisi nilai yang *missing* pada atribut yang bersangkutan. Adapun persamaan matematis untuk teknik *averaging* ini dapat dilihat pada Persamaan (5).

$$y_i = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in}}{N_i}, \quad (5)$$

dimana y_i adalah hasil *averaging* untuk pengisian *missing value* dalam atribut i , x_{in} nilai sampel yang tidak *missing* n dalam atribut i , N_i jumlah sampel yang tidak *missing* dalam atribut i .

Sedangkan untuk menyamakan sebaran nilai yang berbeda disetiap atribut, pada penelitian ini digunakan teknik *min-max scaling* dimana setiap nilai data di-*scaling* pada batasan nilai 0 sampai 1. Tujuan dari tahap ini adalah supaya setiap atribut input (parameter air tambak) memiliki pengaruh yang sama terhadap atribut output (klasifikasi kondisi air tambak) saat proses pemodelan dengan algoritma *machine learning*. Adapun persamaan matematis dari teknik *min-max scaling* ini dapat dilihat pada Persamaan (6).

$$x'_{in} = \frac{x_{in} - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)}, \quad (6)$$

dimana x_{in} adalah nilai dari sampel n dalam atribut i , hasil *scaling* dari x_{in} , dan x_i semua nilai sampel yang ada dalam atribut i .

C. Pemodelan Data dengan Machine Learning

Setelah tahapan *data preprocessing* dilakukan maka didapatkan sebuah dataset yang sudah siap untuk dimodelkan dengan algoritma *machine learning*. Seperti yang telah dijelaskan, algoritma yang digunakan dalam penelitian ini adalah SVM. Selain itu, juga dilakukan studi perbandingan performa model SVM dengan model dari beberapa algoritma *machine learning* lainnya yaitu KNN [10], RF [11], LR [12], CNB [13], dan MLP [14]. Masing-masing algoritma ini memiliki beberapa parameter yang menentukan performa algoritma dalam proses pemodelan data. Untuk menentukan nilai parameter yang tepat dan menghasilkan performa model yang maksimal, maka dalam penelitian ini digunakan algoritma optimasi bernama *grid search*. Algoritma ini bekerja dengan mencoba seluruh nilai yang ada dalam batasan nominal tertentu [8]. Kemudian nilai terbaik diambil berdasarkan hasil performa terbaik dari proses pemodelan data. Akan tetapi, masing-masing algoritma memiliki jenis parameter yang berbeda sehingga *tuning* yang dilakukan *grid search* juga berbeda. Adapun

Tabel 4. Nilai tuning optimasi *grid search*

Algoritma	Parameter	Nilai Tuning	Total
KNN	Jumlah K	1 → 100, step 1	100
SVM	c	1 → 200, step 1	20000
	Gamma (γ)	0,01 → 1, step 0,01	
RF	Jumlah tree (T)	1 → 100, step 1	100
LR	c	0,05 → 5, step 0,05	100
CNB	Alpha (α)	0,01 → 3, step 0,01	300
	Learning rate (L)	0,0001 → 0,001, step 0,0001	
MLP	Solver (S)	SGD dan Adam	120
	Jumlah neuron (N)	100, 200, dan 300	
	Jumlah iterasi (I)	1000 dan 2000	

nilai *tuning* yang digunakan algoritma optimasi *grid search* untuk setiap parameter algoritma *machine learning* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.

Sesuai dengan Tabel 4, maksud dari nilai *tuning* 1 → 100 dengan *step* 1 adalah nilai antara 1 sampai 100 dicacah setiap 1 sehingga terdapat 100 nilai yang akan dicobakan untuk mengoptimasi algoritma yaitu {1, 2, 3, 4, ..., 100}, hal ini juga berlaku untuk nilai *tuning* yang lain. Selanjutnya pada algoritma SVM digunakan kernel RBF sehingga terdapat 2 buah parameter yang perlu dioptimasi yaitu c dan γ . Sedangkan untuk algoritma MLP digunakan 2 jenis *solver* yang berbeda yaitu *stochastic gradient descent* (SGD) [15] dan *adaptive moment estimation* (Adam) [16]. Fungsi optimasi *grid search* ini seperti *cartesian product* yang dapat dilihat kembali pada Persamaan (4) dan Tabel 1.

D. Validasi Model

Suatu mekanisme pengujian perlu dilakukan untuk mengetahui seberapa baik performa suatu model *machine learning*. Secara umum, performa suatu model diukur saat model digunakan untuk mengklasifikasi sampel pada sebuah *test data*. Hasil pengklasifikasian atau *predicted class* tersebut selanjutnya dibandingkan dengan *ground truth* atau *actual class* yang ada di atribut output dalam suatu *test data*.

Dengan demikian didapatkan jumlah *true positive*, *false positive*, *true negative*, dan *false negative* seperti yang ditunjukkan oleh *confusion matrix* pada Tabel 5. Dengan mengetahui *confusion matrix* tersebut, maka dapat dihitung nilai akurasi, presisi, *recall*, *f-measure*, dan luasan AUROC yang menunjukkan tingkat baik-buruknya suatu model klasifikasi. Perbedaan akurasi, presisi, *recall*, *f-measure*, dan AUROC serta teknik perhitungan kelima nilai parameter performa tersebut dapat dilihat pada Persamaan (7) sampai dengan persamaan (14) [17]-[19]. Secara matematis, akurasi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (7),

$$\text{Akurasi} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (7)$$

secara matematis, presisi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (8),

$$\text{Presisi} = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (8)$$

secara matematis, *recall* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (9),

Tabel 5. *Confusion matrix*

Class (Atribut output dalam dataset)		Actual Class	
		Baik (1)	Buruk (0)
Predicted Class	Baik (1)	True Positive (TP)	False Positive (FP)
	Buruk (0)	False Negative (FN)	True Negative (TN)

Tabel 6. Ilustrasi *K-fold cross validation*

Dataset	Iterasi 1	Iterasi 2	Iterasi 3	Iterasi 4	Iterasi 5
Bag. 1	O	X	X	X	X
Bag. 2	X	O	X	X	X
Bag. 3	X	X	O	X	X
Bag. 4	X	X	X	O	X
Bag. 5	X	X	X	X	O

Keterangan:

O : test data

X : data untuk pemodelan (train data)

$$Recall = TPR = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (9)$$

secara matematis, *f-measure* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (10),

$$f - measure = 2 \times \frac{Presisi \times Recall}{Presisi + Recall}. \quad (10)$$

Berbeda dengan keempat nilai parameter akurasi, presisi, *recall*, dan *f-measure*, nilai AUROC didapatkan dengan menghitung luasan area di bawah kurva *receiver operating characteristic* (ROC). Dengan kata lain besar nilai luasan AUROC ini bergantung dari bentuk lengkungan kurva ROC itu sendiri. Untuk mendapatkan kurva ROC tersebut, 2 hal yang perlu dikalkulasi terlebih dahulu adalah nilai *true positive rate* (TPR) dan *false positive rate* (FPR). TPR juga disebut sebagai *recall* sehingga untuk mengkalkulasi nilai TPR dapat menggunakan Persamaan (9). Sedangkan untuk mengkalkulasi FPR dapat menggunakan rumus seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (11),

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN}, \quad (11)$$

setelah mendapatkan kedua nilai TPR dan FPR di setiap iterasi *k-fold cross validation*, maka kurva ROC dapat dibentuk dan selanjutnya luasan AUROC dapat dihitung. Pola kurva ROC ini berbeda-beda disetiap algoritma dan model data sehingga mengakibatkan luasan AUROC yang berbentuk sembarang. Oleh karena itu, untuk menghitung luasan AUROC secara diskrit dapat menggunakan pendekatan *trapezoidal rule* yang ditunjukkan oleh Persamaan (12) sampai dengan Persamaan (14),

$$a_i = TPR(FPR(x_i)) + TPR(FPR(x_{i+1})), \quad (12)$$

$$h_i = |FPR(x_{i+1}) - FPR(x_i)|, \quad (13)$$

$$AUROC = \sum_{i=0}^1 \frac{a_i \times h_i}{2}, \quad (14)$$

dimana α_i merupakan jumlah sisi sejajar trapesium (*trapezoid*) dan adalah h_i tinggi trapesium. Dengan menggunakan pendekatan *trapezoid rule*, luasan bangun sembarang yang dibentuk di bawah kurva ROC dapat dihitung secara diskrit.

Suatu model *machine learning* dikatakan memiliki performa yang baik dalam melakukan proses klasifikasi

sampel data dalam sebuah dataset jika memiliki hasil perhitungan akurasi, presisi, *recall*, *f-measure*, dan luasan AUROC yang tinggi. Akurasi merepresentasikan seberapa akurat suatu model dalam melakukan klasifikasi. Sementara presisi, *recall*, dan *f-measure* merepresentasikan tingkat kekonsistenan model dalam melakukan klasifikasi. Nilai presisi dan *recall* ini tidak boleh terlalu timpang karena mengindikasikan kecenderungan prediksi model tersebut (lebih banyak ke *class* 1 atau 0) dan inilah yang direpresentasikan dengan nilai *f-measure*. Sementara luasan AUROC mengindikasikan kinerja model dalam melakukan klasifikasi yaitu perbandingan nilai TPR dan FPR atau *rate* prediksi benar dengan yang salah. Semakin besar TPR terhadap FPR maka semakin bagus. TPR yang lebih tinggi dibanding FPR menyebabkan kurva ROC semakin melengkung tinggi dan berdampak pada luasan AUROC yang semakin luas. Sehingga dapat dikatakan bahwa semakin luas AUROC maka mengindikasikan semakin bagus kinerja model tersebut [18]-[19]. Untuk mendapatkan nilai parameter-parameter performa atau indikator kinerja tersebut maka diperlukan sebuah mekanisme validasi terhadap model *machine learning* yang terbentuk.

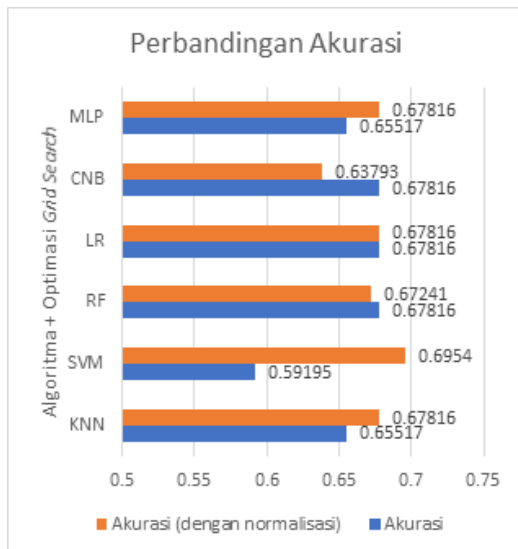
Pada penelitian ini digunakan mekanisme validasi yang disebut dengan *k-fold cross validation* dimana satu dataset utuh dibagi ke dalam sejumlah bagian *k*. Pada *k* bagian tersebut, 1 bagian digunakan sebagai *test data* dan bagian yang lain digunakan untuk pemodelan (*train data*) [20]. Pada iterasi pertama, proses *training* dilakukan dengan menggunakan *train data* dan didapatkan sebuah model yang merepresentasikan *train data* tersebut. Selanjutnya, model itu diuji untuk memprediksi nilai atribut output pada *test data* dan didapatkan hasil perhitungan nilai-nilai parameter performa model tersebut. Kemudian pada iterasi berikutnya, bagian data yang lain digunakan untuk *test data* dan sisanya untuk pemodelan (*train data*). Begitu seterusnya sehingga setiap data pernah menjadi *test data* dan juga data untuk pemodelan (*train data*) [21]. Pada penelitian ini digunakan *5-fold cross validation* sehingga ada 5 kali iterasi dimana setiap iterasi 20% dataset menjadi *test data* dan 80% sisanya menjadi data untuk pemodelan dengan algoritma *machine learning*. Ilustrasi dari konsep *k-fold cross validation* ini dapat dilihat pada Tabel 6.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

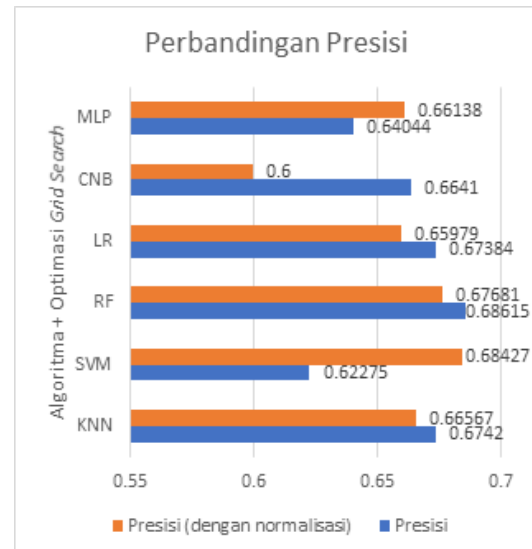
Pada bab ini dijelaskan perbandingan performa dari berbagai algoritma *machine learning* yang digunakan. Komparasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan akurasi, presisi, *recall*, *f-measure*, dan luasan AUROC yang didapat dari proses pengolahan data dan validasi dengan mekanisme *5-fold cross validation*. Selain itu, pengaruh normalisasi data terhadap perolehan nilai *confusion matrix* dan AUROC juga diperhitungkan.

A. Perbandingan Akurasi

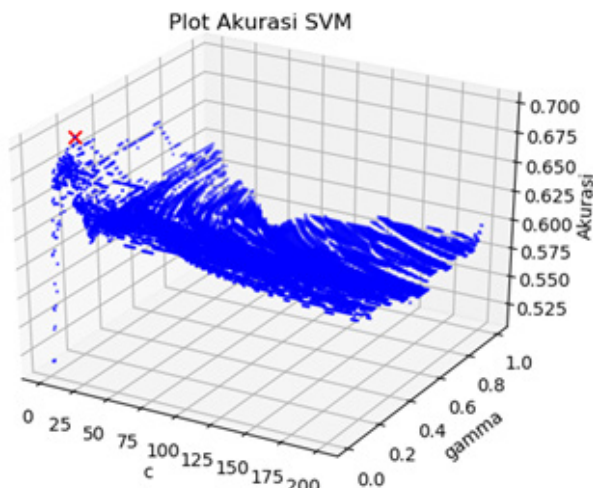
Dalam bidang *machine learning* khususnya pada



Gambar 3. Grafik perbandingan akurasi



Gambar 5. Grafik perbandingan presisi



Keterangan:

- . (biru) : bukan akurasi tertinggi
- X (merah) : akurasi tertinggi (pada $c = 3$, $\gamma = 0,17$)

Gambar 4. Nilai akurasi SVM pada setiap nilai *tuning*

persoalan klasifikasi, suatu model dikatakan memiliki akurasi yang tinggi jika model tersebut dapat memprediksi output dari sejumlah input data dengan benar. Sesuai dengan namanya, nilai akurasi ini merepresentasikan seberapa akurat sebuah model dalam melakukan prediksi suatu *class*. Pada penelitian ini, tingkat akurasi diukur berdasarkan seberapa banyak *predicted class* yang sesuai dengan *actual class* dari sejumlah sampel data dalam *test data*. Sesuai dengan Persamaan (7), akurasi dihitung berdasarkan jumlah prediksi benar yaitu $TP + TN$ dibagi dengan seluruh jumlah prediksi yang dilakukan yaitu $TP + TN + FP + FN$. Dengan menggunakan mekanisme *5-fold cross validation*, maka didapatkan 5 nilai akurasi dari pengujian model terhadap 5 *test data* yang berbeda pada setiap iterasi. Oleh karena itu, nilai akurasi diambil dengan melakukan rata-rata terhadap kelima nilai tersebut dan didapatkan akurasi untuk setiap algoritma seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

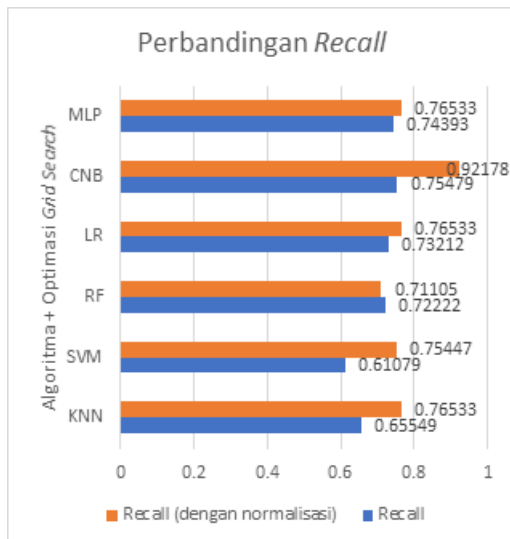
Akurasi tertinggi sebesar 0,6954 diperoleh dengan menggunakan algoritma SVM kernel RBF yang

dioptimasi dengan *grid search*. Dengan optimasi *grid search* didapatkan parameter kernel RBF paling optimal yaitu untuk c sebesar 3 dan γ sebesar 0,17. Dari hasil ini dapat dilihat juga bahwa dengan mengaplikasikan teknik normalisasi *min-max scaling* pada tahapan *data preprocessing* cukup berpengaruh dalam meningkatkan nilai akurasi. Hal ini terbukti dari skor tertinggi didapatkan dengan mengaplikasikan normalisasi data terlebih dahulu sebelum diproses SVM. Selain itu penggunaan normalisasi juga berpengaruh pada peningkatan akurasi algoritma MLP dan KNN tetapi tidak dengan CNB dan RF. Pada algoritma LR, normalisasi tidak membawa pengaruh terhadap pencapaian akurasi. Adapun plot grafik nilai akurasi SVM kernel RBF pada setiap nilai *tuning grid search* untuk $c = 1$ sampai dengan 200 dan $\gamma = 0,01$ sampai dengan 1 dapat dilihat pada Gambar 4.

B. Perbandingan Presisi

Selain harus mempunyai performa akurasi yang tinggi, sebuah model dikatakan baik dalam mengklasifikasi apabila juga memiliki nilai presisi yang tinggi. Presisi sendiri mengindikasikan tingkat kekonsistenan suatu model dalam melakukan klasifikasi. Pada penelitian ini, presisi didapatkan dengan menghitung jumlah prediksi suatu *class* yang benar atau TP dibagi dengan seluruh jumlah total prediksi yang ditujukan pada *class* tersebut atau $TP + FP$. Seperti dijelaskan pada sub bab sebelumnya, dengan mekanisme *5-fold cross validation* maka didapatkan 5 nilai presisi pada setiap iterasi validasi. Kemudian nilai presisi akhir diambil dengan merata-rata kelima nilai tersebut. Adapun perbandingan nilai presisi untuk setiap algoritma dan pengaruh normalisasi pada tahap *data preprocessing* dapat dilihat pada Gambar 5.

Nilai presisi tertinggi didapatkan oleh algoritma RF yang dioptimasi *grid search* dengan nilai sebesar 0,68615. Sementara algoritma yang diusulkan dalam penelitian ini yaitu SVM berada di urutan kedua dengan nilai 0,68427. Dengan optimasi *grid search* pada algoritma RF didapatkan



Gambar 6. Grafik perbandingan recall

parameter jumlah *tree* paling optimal yaitu sejumlah 28 *trees*. Dari grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa normalisasi justru menurunkan nilai presisi pada setiap algoritma kecuali SVM dan MLP. Dengan normalisasi *min-max scaling* pada tahap *data preprocessing*, nilai presisi SVM hampir menyamai presisi RF dimana selisih nilainya hanya sebesar 0,00188.

C. Perbandingan Recall

Sama halnya dengan nilai presisi, nilai yang ditunjukkan *recall* juga mengindikasikan kekonsistenan model dalam melakukan klasifikasi. Perbedaan adalah pada cara menghitungnya yaitu jumlah prediksi suatu *class* yang benar atau TP dibagi dengan jumlah *actual class* yang ada pada *class* yang diprediksi atau dibagi dengan TP + FN. Dengan kata lain, jika presisi membandingkan jumlah total prediksi benar dengan jumlah prediksi yang ditujukan pada *class* yang dituju, maka *recall* membandingkan jumlah prediksi benar dengan jumlah *actual class* yang dituju. Adapun *recall* akhir diambil dengan melakukan *averaging* pada kelima nilai *recall* yang diperoleh dengan mekanisme *5-fold cross validation*. Hasil perbandingan nilai *recall* dari seluruh algoritma yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 6.

Sesuai dengan grafik pada Gambar 6, nilai *recall* tertinggi didapatkan dengan menggunakan algoritma CNB yang dioptimasi dengan *grid search*. Dengan optimasi *grid search* didapatkan parameter α paling optimal yaitu sebesar 0,01. Nilai *recall* tertinggi ini juga dipengaruhi oleh normalisasi data sehingga didapatkan nilai sebesar 0,92178. Dengan menggunakan normalisasi pada tahap *data preprocessing*, setiap algoritma mengalami peningkatan nilai *recall* kecuali algoritma RF yang justru mengalami penurunan nilai dengan selisih 0,01117.

D. Perbandingan *f-measure*

Sama halnya dengan presisi dan *recall*, *f-measure*

juga menunjukkan kekonsistenan model dalam melakukan proses klasifikasi. Perbedaannya adalah jika presisi membandingkan dengan jumlah total prediksi yang ditujukan pada suatu *class* (TP + FP) dan *recall* membandingkan dengan jumlah *actual class* (TP + FN), maka *f-measure* membandingkan dengan keduanya (TP x (FP + FN)). Baik presisi, *recall*, maupun *f-measure* perlu diketahui nilainya untuk melihat kecenderungan model dalam melakukan prediksi. Jika nilai presisi jauh lebih tinggi dibanding nilai *recall* atau sebaliknya maka model tersebut terindikasi cenderung mengarahkan prediksinya hanya pada salah satu *class* saja (0 atau 1). Akan tetapi jika nilai *f-measure*nya tinggi, hal ini menandakan model tersebut dapat melakukan prediksi yang seimbang di kedua *class* yang ada. Sesuai dengan persamaan 10, nilai *f-measure* didapat dengan menghitung $2 \times \text{presisi} \times \text{recall}$ dibagi dengan presisi + *recall*. Dengan melakukan substitusi pada Persamaan (10) dengan Persamaan (8) dan Persamaan (9) maka didapatkan rumus untuk menghitung *f-measure* seperti pada Persamaan (15),

$$f - measure = 2 \times \frac{\text{Presisi} \times \text{Recall}}{\text{Presisi} + \text{Recall}}$$

$$f - measure = 2 \times \frac{\frac{TP}{TP + FP} \times \frac{TP}{TP + FN}}{\frac{TP}{TP + FP} + \frac{TP}{TP + FN}}$$

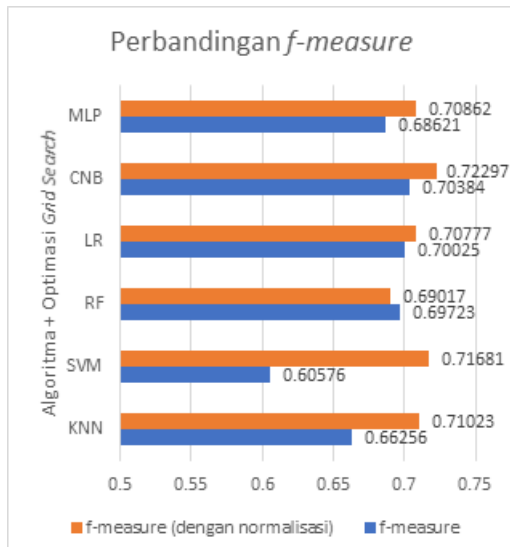
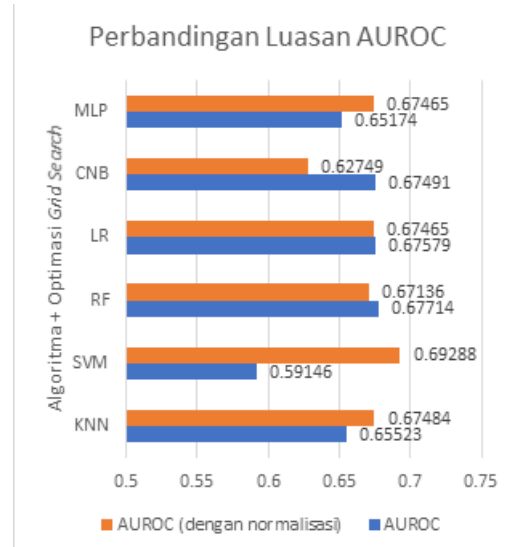
$$f - measure = 2 \times \frac{\frac{TP^2}{TP^2 + TPFN + TPFP + FPFN}}{\frac{TP^2 + TPFN + TPFP + FPFN}{2TP^2 + TPFN + TPFP}}$$

$$f - measure = 2 \times \frac{TP^2}{2TP^2 + TPFN + TPFP}$$

$$f - measure = \frac{2TP}{2TP + FN + FP} \quad (15)$$

Dari penurunan persamaan tersebut dapat dikatakan bahwa semakin nilai presisi suatu model mendekati nilai *recall*nya maka semakin besar nilai *f-measure*. Kemudian semakin tinggi nilai *f-measure* maka semakin bagus suatu model karena memiliki tingkat kekonsistenan yang tinggi dalam melakukan klasifikasi. Proses berikutnya adalah sama seperti sub bab sebelumnya dimana kelima nilai *f-measure* dari *5-fold cross validation* dirata-rata sehingga didapatkan satu nilai *f-measure* untuk setiap performa model algoritma *machine learning*. Adapun komparasi nilai *f-measure* dari masing-masing algoritma *machine learning* dapat dilihat pada Gambar 7.

Nilai *f-measure* tertinggi didapatkan oleh algoritma CNB yang dioptimasi *grid search* dan dilakukan normalisasi pada tahap *data preprocessing* dengan nilai sebesar 0,72297. Dengan optimasi *grid search* didapatkan parameter α paling optimal yaitu sebesar 0,01. Secara garis besar, hampir semua algoritma *machine learning* kecuali RF mengalami peningkatan nilai *f-measure* ketika dilakukan proses normalisasi data terlebih dahulu sebelum proses pengolahan data.

Gambar 7. Grafik perbandingan *f-measure*

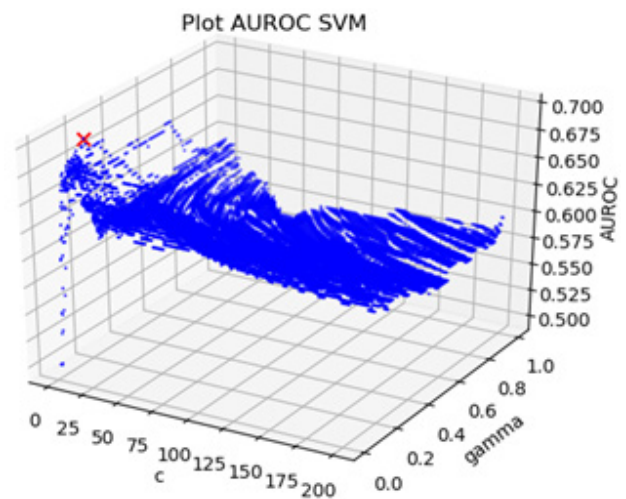
Gambar 8. Grafik perbandingan luasan AUROC

E. Perbandingan luasan AUROC

Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, AUROC merupakan luasan area yang berada di bawah kurva ROC. ROC sendiri merupakan kurva yang dibentuk berdasarkan nilai TPR terhadap FPR. Mengetahui luasan AUROC sangat penting untuk mengetahui kinerja model yang ditunjukkan dengan nilai TPR dan FPRnya. Semakin tinggi TPR terhadap nilai FPR maka semakin tinggi lengkungan kurva yang dibentuk dan semakin luas area di bawah kurva tersebut (AUROC). Semakin luas luasan AUROC maka semakin bagus juga kinerja model *machine learning* tersebut. Sebelum menghitung AUROC, terdapat 2 hal yang perlu dikalkulasi terlebih dahulu yaitu TPR dan FPR di setiap iterasi *cross validation*. Adapun cara untuk mengkalkulasi kedua nilai tersebut dapat dilihat kembali pada Persamaan (9) dan Persamaan (11). Kemudian dari 2 nilai tersebut dapat dibentuk kurva ROC dan selanjutnya dapat dihitung luasan AUROC dengan Persamaan (14). Dari percobaan yang telah dilakukan didapatkan hasil perhitungan AUROC seperti pada Gambar 8.

Seperti ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 8, dengan menggunakan teknik normalisasi *min-max scaling* dan algoritma SVM kernel RBF yang dioptimasi *grid search*, didapatkan AUROC terluas dengan luasan sebesar 0,69288. Dengan optimasi *grid search* didapatkan kombinasi nilai *tuning* parameter SVM kernel RBF paling optimal yaitu untuk γ sebesar 0,17 dan c sebesar 3. Pada perbandingan ini, 3 algoritma *machine learning* mengalami peningkatan dengan pengaplikasian normalisasi sedangkan 3 algoritma lainnya mengalami penurunan. Adapun plot grafik luasan AUROC SVM kernel RBF pada setiap nilai *tuning grid search* untuk $c = 1$ sampai dengan 200 dan $\gamma = 0,01$ sampai dengan 1 dapat dilihat pada Gambar 9.

Sesuai dengan plot grafik pada Gambar 4 dan Gambar 9 dapat dilihat bahwa pola grafik akurasi dan AUROC relatif sama pada setiap nilai *tuning* yang diberikan *grid search*. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai akurasi model maka semakin luas nilai luasan AUROCnya.



Keterangan:
 . (biru) : bukan AUROC terluas
 X (merah) : AUROC terluas (pada $c = 3$, $\gamma = 0,17$)

Gambar 9. Luasan AUROC SVM pada setiap nilai *tuning*

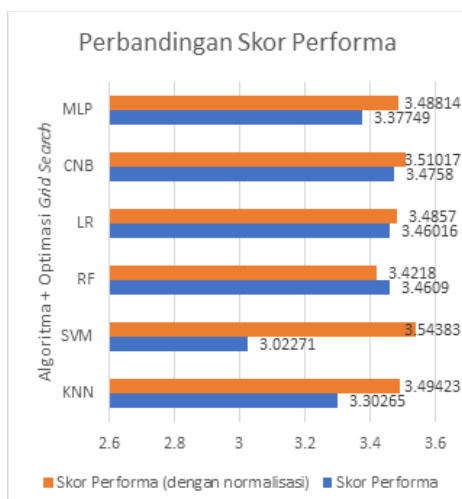
F. Perbandingan Total

Seperti dijelaskan sebelumnya, suatu model *machine learning* dikatakan memiliki performa yang bagus jika memiliki nilai akurasi, presisi, *recall*, *f-measure* dan luasan AUROC yang tinggi. Oleh karena itu, untuk menentukan model algoritma terbaik maka pada penelitian ini kelima parameter tersebut dijumlahkan. Dengan demikian maka setiap parameter performa memberikan pengaruh yang sama dalam menentukan model algoritma terbaik. Semakin tinggi skor performa yang didapat maka semakin bagus model algoritma tersebut. Adapun hasil akumulasi nilai performa model *machine learning* dan perbandingannya dapat dilihat pada Gambar 10.

Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 10, dapat disimpulkan bahwa performa terbaik diperoleh oleh model dari algoritma SVM yang dioptimasi *grid search* dengan c optimal sebesar 3 dan γ optimal sebesar 0,17 serta dengan melakukan normalisasi pada tahap *data preprocessing*.

Tabel 7. Rekapitulasi data perbandingan performa model *machine learning*

Normalisasi	Algoritma	Grid Tuning	Akurasi	Presisi	Recall	f-measure	AUROC	Skor Total
Tidak	KNN	K = 17	0,65517	0,6742	0,65549	0,66256	0,65523	3,30265
Ya		K = 29	0,67816	0,66567	0,76533	0,71023	0,67484	3,49423
Tidak	SVM	c = 2 $\gamma = 0,02$	0,59195	0,62275	0,61079	0,60576	0,59146	3,02271
Ya		c = 3 $\gamma = 0,17$	0,6954	0,68427	0,75447	0,71681	0,69288	3,54383
Tidak	RF	T = 28	0,67816	0,68615	0,72222	0,69723	0,67714	3,4609
Ya		T = 22	0,67241	0,67681	0,71105	0,69017	0,67136	3,4218
Tidak	LR	c = 3,25	0,67816	0,67384	0,73212	0,70025	0,67579	3,46016
Ya		c = 0,4	0,67816	0,65979	0,76533	0,70777	0,67465	3,4857
Tidak	CNB	$\alpha = 0,01$	0,67816	0,6641	0,75479	0,70384	0,67491	3,4758
Ya		$\alpha = 0,01$	0,63793	0,6	0,92178	0,72297	0,62749	3,51017
Tidak	MLP	N = 100 L = 0,0009 I = 2000 S = SGD	0,65517	0,64044	0,74393	0,68621	0,65174	3,37749
Ya		N = 200 L = 0,0001 I = 2000 S = ADAM	0,67816	0,66138	0,76533	0,70862	0,67465	3,48814



Gambar 10. Grafik perbandingan performa model algoritma

Model SVM dikatakan yang terbaik karena memiliki jumlah skor performa paling tinggi dibandingkan dengan model algoritma *machine learning* yang lain. Adapun skor performa yang didapatkan adalah sebesar 3,54383 yang didapatkan dari akumulasi nilai rata-rata akurasi, presisi, *recall*, *f-measure*, dan luasan AUROC. Akumulasi nilai dilakukan karena kelima parameter performa atau indikator kinerja tersebut diperhitungkan seluruhnya dalam pemilihan model terbaik untuk klasifikasi kondisi air tambak.

Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 10, dapat dikatakan juga bahwa penggunaan teknik normalisasi *min-max scaling* sangat berpengaruh untuk algoritma *machine learning* dimana setiap algoritma (kecuali algoritma RF) mengalami peningkatan performa setelah dilakukan normalisasi *min-max scaling* pada tahap *data preprocessing*.

Fenomena ini sesuai dengan yang telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya yaitu dengan mengaplikasikan normalisasi maka didapatkan atribut input data dengan sebaran nilai yang sama.

Dengan sebaran nilai yang sama maka setiap atribut input (parameter air) memiliki pengaruh yang sama terhadap atribut output (klasifikasi kondisi air). Dengan kata lain, akibat baik dari normalisasi data adalah tidak terjadinya dominasi pada atribut input data dalam proses pemodelan. Teknik normalisasi *min-max scaling* sangat berpengaruh bagi algoritma-algoritma *machine learning* yang memproses data berdasarkan perhitungan matematis. Peningkatan paling signifikan terjadi pada algoritma SVM dengan selisih nilai 0,52112. Sementara itu, normalisasi tidak memberi pengaruh signifikan pada algoritma lain.

Adapun hasil rekapitulasi seluruh data percobaan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 7. Dapat dilihat bahwa model yang dibentuk dengan algoritma SVM dengan kernel RBF serta dengan optimasi algoritma *grid search* tidak menghasilkan nilai akurasi diatas 70%. Hal ini bisa disebabkan oleh karakteristik dataset yang menyebar dimana data-data sampel dengan *class* yang sama tidak berdekatan namun membaaur dengan data-data dari *class* lain. Fenomena ini dapat terjadi jika setiap parameter atau atribut data tidak menunjukkan nilai-nilai yang berbeda secara signifikan dalam merepresentasikan *class*nya masing-masing, sehingga mengakibatkan algoritma SVM kesulitan dalam membentuk model klasifikasi yang dapat memisahkan data-data dari 2 buah *class* yang berbeda. Hal ini juga sesuai dengan penjelasan pada bab sebelumnya dimana parameter air tambak cenderung tidak berubah secara signifikan ketika air tambak berubah kondisi dari baik ke buruk ataupun sebaliknya.

V. KESIMPULAN

Dari serangkaian percobaan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa model terbaik untuk klasifikasi kondisi air tambak didapatkan oleh model yang dibentuk dengan algoritma SVM kernel RBF yang dioptimasi dengan menggunakan algoritma *grid search* dimana didapatkan nilai optimasi paling optimal yaitu 3 untuk parameter c dan 0,17 untuk parameter γ . Adapun skor performa paling tinggi yang didapatkan oleh model algoritma SVM ini adalah 3,54383 yang didasarkan dari akumulasi perhitungan nilai akurasi, presisi, *recall*, *f-measure*, dan luasan AUROC saat proses pemodelan dan validasi. Selain itu, normalisasi yang dilakukan dengan menggunakan teknik *min-max scaling* pada tahap *data preprocessing* juga memberi pengaruh pada performa model yang dibentuk. Hal ini dibuktikan dari peningkatan skor performa pada seluruh algoritma *machine learning* kecuali algoritma RF. Peningkatan performa paling signifikan terjadi pada algoritma SVM kernel RBF dimana selisih skor performa antara model dengan normalisasi dan model tanpa normalisasi sebesar 0,52112. Sementara itu, normalisasi tidak memberi pengaruh yang signifikan bagi model algoritma yang lain. Dengan demikian kesimpulan akhir yang dapat ditarik dalam penelitian ini adalah bahwa model algoritma yang paling bagus untuk dipakai dalam mengatasi permasalahan klasifikasi kondisi air tambak selama proses budidaya perairan (akuakultur) adalah model yang dibentuk dengan algoritma SVM kernel RBF dengan optimasi *grid search* pada parameter c dan γ serta dilakukan proses normalisasi *min-max scaling* pada tahap *data preprocessing*.

REFERENSI

- [1] H. M. Atmomarsono, Supito, M. Mangampa, and H. W. Pitoyo, *Better Management Practice Budidaya Udang Vanamei*, 1st ed., Jakarta, WWF Indonesia, 2014.
- [2] D. Yuswantoro, O. Natan, A. N. Angga, A. I. Gunawan, Taufiqurrahman, B. S. B. Dewantara, dan A. Kurniawan, "Fuzzy logic-based control system for dissolved oxygen control on indoor shrimp cultivation," *IES-ETA*, pp. 37-42, 2018.
- [3] C. Liao dan C. H. Wen, "SVM-Based Dynamic Voltage Prediction for Online Thermally Constrained Task Scheduling in 3-D Multicore Processors," *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 10, no. 2, pp. 49-52, 2018.
- [4] Y. Guo, X. Jia, dan D. Paull, "Effective Sequential Classifier Training for SVM-Based Multitemporal Remote Sensing Image Classification," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 27, no. 6, pp. 3036-3048, 2018.
- [5] A. Rojas-Domínguez, L. C. Padierna, J. M. Carpio Valadez, H. J. Puga-Soberanes, dan H. J. Fraire, "Optimal Hyper-Parameter Tuning of SVM Classifiers with Application to Medical Diagnosis," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 7164-7176, 2018.
- [6] C. Cortes dan V. Vapnik, "Support-Vector Networks," *Machine Learning*, vol. 20, no. 3, pp. 273-297, 1995.
- [7] J. P. Vert, K. J. Tsuda, dan B. Scholkopf, "A Primer on Kernel Methods," *Kernel Methods in Computational Biology*, 2004.
- [8] J. Bergstra dan Y. Bengio, "Random Search for Hyper-Parameter Optimization," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 13, pp. 281-305, 2012.
- [9] D. Pyle, *Data Preparation for Data Mining*. Morgan Kaufmann Publishers, Los Altos, California. 1999.
- [10] N. S. Altman, "An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression," *The American Statistician*, vol. 46, no. 3, pp. 175-185, 1992.
- [11] H. T. Kam, "Random Decision Forests," *International Conference on Document Analysis and Recognition*, vol. 14, pp. 278-282, 1995.
- [12] D. A. Freedman, "Statistical Models: Theory and Practice," *Cambridge University Press*, p. 128, 2009.
- [13] J. D. Rennie, L. Shih, J. Teevan, dan D. R. Karger, "Tackling the Poor Assumptions of Naive Bayes Text Classifiers," *20th International Conference on Machine Learning*, vol. 3, pp. 616-623, 2003.
- [14] R. Collobert dan S. Bengio, "Links between Perceptrons, MLPs and SVMs," *21st International Conference on Machine Learning*, 2004.
- [15] S. Mei, "A mean field view of the landscape of two-layer neural networks," *National Academy of Sciences*, vol. 33, p. 115, 2018.
- [16] D. P. Kingma dan L. B. Jimmy, "Adam: A Method for Stochastic Optimization," *International Conference on Learning Representations*, 2015.
- [17] F. Tom, "An Introduction to ROC Analysis," *Pattern Recognition Letters*, vol. 27, no. 8, pp. 861-874, 2006.
- [18] S. V. Stehman, "Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy," *Remote Sensing of Environment*, vol. 62, no. 1, pp. 77-89, 1997.
- [19] D. M. W. Powers, "Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation," *Journal of Machine Learning Technologies*, vol. 2, no. 1, pp. 37-63, 2011.
- [20] R. Kohavi, "A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection," in *Proc. 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1995, p. 1137.
- [21] S. Arlot dan A. Celisse, "A Survey of Cross-Validation Procedures for Model Selection," *Statistics Surveys*, vol. 4, pp. 40-79, 2010.

Implementasi Fuzzy Logic dan Trajectory pada Manipulator Mobile Robot Untuk Deteksi Kebocoran Gas

Rendyansyah, Aditya P. P. Prasetyo, dan Kemahyanto Exaudi
Jurusan Sistem Komputer Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Sriwijaya
Jl. Palembang-Prabumulih KM 32, Indralaya 30662
e-mail: rendyansyah@ilkom.unsri.ac.id

Abstrak—Teknologi yang berkembang dapat mempermudah aktivitas pekerjaan, salah satunya teknologi di bidang robotik. Salah satu tujuan robot diciptakan untuk membantu dalam investigasi target yang dicurigai. Target tersebut dapat berupa objek kebocoran sumber gas. Di sisi lain, kebocoran gas dalam kawasan industri mengakibatkan dampak yang besar bagi lingkungan. Robot sangat diperlukan untuk mempermudah dalam proses inspeksi target yang diduga kebocoran gas. Robot pada umumnya memiliki sistem yang terintegrasi dengan sensor sebagai interface dan komputasi cerdas. Pada penelitian ini telah dirancang *mobile robot* dan *manipulator* yang terintegrasi dan memiliki tujuan untuk menginspeksi objek yang diduga kebocoran gas. Sistem robot ini disebut *manipulator mobile robot* yang dilengkapi dengan kamera *wireless* untuk deteksi objek, dua buah sensor gas untuk deteksi aroma, masing-masing sensor dipasang pada *end-effector manipulator* dan di samping kamera. Adapun metode yang digunakan pada robot yaitu *fuzzy logic* dan *cubic trajectory*. *Fuzzy logic* digunakan untuk navigasi robot menuju objek, dan *cubic trajectory* untuk navigasi *manipulator* berdasarkan rute yang ditentukan. Pada percobaan yang telah dilakukan, *mobile robot* dapat bernavigasi menuju target sampai berhenti pada jarak 20cm, dan *manipulator* juga berhasil dalam bernavigasi. Dalam instrumen pengujian, telah ditentukan dua titik bocor. Masing-masing titik diuji sebanyak enam kali. Adapun robot berhasil dalam mendeteksi kebocoran gas dengan keberhasilan mencapai 91,67%, dan posisi koordinat yang terbaca oleh *manipulator* dapat diamati melalui monitor.

Kata kunci: *fuzzy logic, manipulator mobile robot, trajectory*

Abstract—Developing technology can facilitate work activities, one of which is technology in the field of robotics. One of the purposes of creating the robot was to assist in investigating suspected targets. The target can be a gas source leak object. On the other hand, gas leaks in industrial estates have a large impact on the environment. Robots are needed to facilitate the inspection process of targets suspected of gas leakage. Robots generally have systems that are integrated with sensors as interfaces and intelligent computing. In this study mobile robots and manipulators have been designed and have the purpose of inspecting objects suspected of being gas leaks. This robot system is called a mobile robot manipulator equipped with a wireless camera for object detection, two gas sensors for aroma detection, each sensor is mounted on the end-effector manipulator and next to the camera. The methods used in robots are fuzzy logic and cubic trajectory. Fuzzy logic is used to navigate robots to objects, and cubic trajectory for navigating manipulators based on the specified route. In the experiments that have been done, the mobile robot can navigate to the target until it stops at a distance of 20cm, and the manipulator is also successful in navigating. In the testing instrument, two leaking points have been determined. Each point is tested six times. The robot succeeded in detecting gas leaks with success rate 91.67%, and the position of coordinates read by the manipulator can be observed through the monitor.

Keywords: *fuzzy logic, manipulator mobile robot, trajectory*

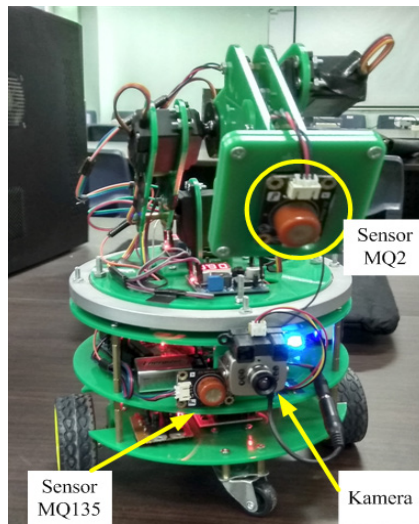
Copyright © 2018 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Teknologi modern semakin berkembang pesat guna membantu aktivitas pekerjaan manusia. Salah satunya teknologi robot yang dimanfaatkan untuk proses investigasi objek yang dicurigai [1]. Pada dasarnya robot diciptakan untuk membantu kehidupan manusia, seperti bekerja di kawasan yang sulit diprediksi. Robot yang canggih didukung dengan teknologi sensor sebagai *interface* antar

robot dengan lingkungan, dan komputasi kecerdasan buatan yang di-implementasikan di dalam prosesor. Ada banyak jenis robot sesuai fungsi dan kegunaan, misalnya *mobile robot* untuk navigasi di dalam lingkungan dan *manipulator robot* juga untuk navigasi pada daerah kerja di dalam jangkauan lengan.

Seperti halnya *mobile robot* yang diaplikasikan pada lingkungan dengan permukaan datar untuk tujuan bergerak bebas. Seperti pada aplikasi *mobile robot* dalam



Gambar 1. Manipulator mobile robot

pencari target sumber gas dengan memanfaatkan sensor pendukungnya seperti sensor gas yang dilakukan oleh Albornozy dkk [2], dan dengan penambahan kamera *wireless* oleh Herjuno dkk [3]. Nurmaini dkk [4] dan Husni dkk [5] juga membahas pencarian target aroma gas berbasis *mobile robot* dengan navigasi cerdas menggunakan *fuzzy logic*. Penggunaan *fuzzy logic* memberikan kemudahan dalam pengambilan keputusan berdasarkan pengalaman.

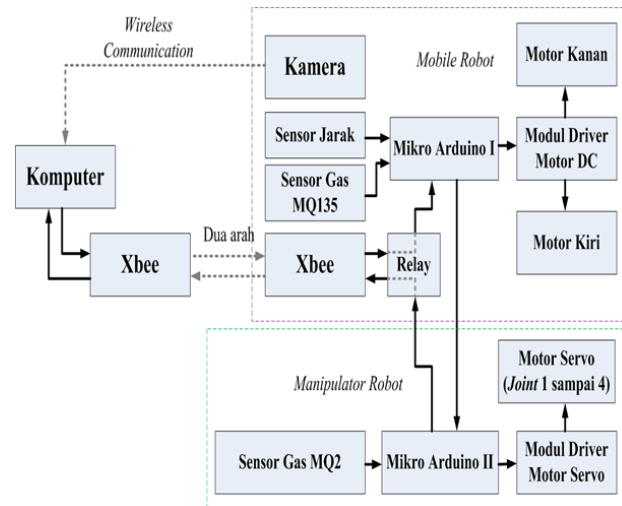
Di sisi lain, penggunaan *manipulator robot* juga dapat diimplementasikan dalam pencarian target kebocoran gas. Gustica dkk [6] membahas lengan robot dengan tiga derajat kebebasan sebagai alat untuk deteksi kebocoran gas. Pergerakan *manipulator robot* ini menggunakan metode *fuzzy logic* yang diolah di dalam prosesor berdasarkan informasi dari sensor gas. Penelitian berikutnya juga membahas metode pergerakan *manipulator robot* berbasis pendekatan kinematik [7], dan pergerakan *manipulator* menggunakan *trajectory planning* dengan rute yang ditentukan [8]-[10]. Berdasarkan keunggulan dari kedua metode tersebut, *fuzzy logic* memudahkan pergerakan robot pada lingkungan yang tidak terstruktur, sedangkan *trajectory planning* berdasarkan pola koordinat yang ditentukan.

Oleh karena itu pada penelitian ini diaplikasikan *mobile robot* dan *manipulator* menjadi sistem *hybrid* untuk menginspeksi target. Penggabungan ini menjadi *olfactory manipulator mobile robot*. Adapun motivasi dari penggabungan ini didasarkan pada cara mendekatkan sensor gas untuk mendapatkan hasil deteksi yang baik. Metode pergerakan *mobile robot* dalam menuju target menggunakan *fuzzy logic* dengan *input* dari kamera, sedangkan untuk pergerakan *manipulator* menggunakan *trajectory planning*.

II. METODE

A. Perancangan Manipulator Mobile Robot

Manipulator mobile robot terdiri dari *mobile robot*



Gambar 2. Skematik hardware pada manipulator mobile robot

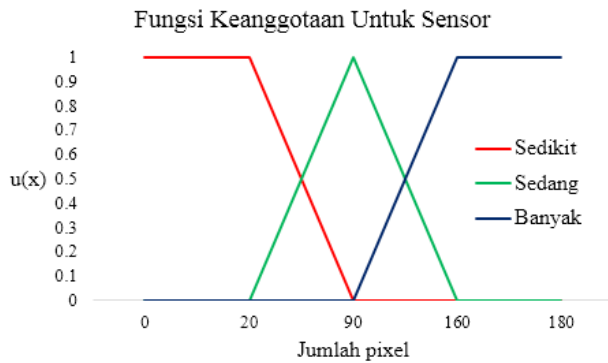
dan *manipulator* yang terintegrasi, dan dirancang dengan bentuk sederhana. *Mobile robot* dilengkapi dengan kamera *wireless* untuk deteksi objek, sensor jarak, dan gas, dan sistem komunikasi *wireless* menggunakan xbee. Selanjutnya pada *manipulator* terdiri dari tiga derajat kebebasan dan juga diberi sensor gas pada *end-effector*. Gambar 1 merupakan bentuk *manipulator mobile robot* yang telah dirancang di dalam penelitian ini. *Mobile robot* dan *manipulator* ini mempunyai fungsi masing-masing dan keduanya dikontrol melalui komputer yang telah diimplementasikan metode *fuzzy logic* dan *cubic trajectory*. Data dari komputer ditransfer ke robot melalui komunikasi *wireless*. Adapun tugas *mobile robot* untuk menavigasi robot menuju target, sedangkan *manipulator robot* membantu sensor gas dalam pendeteksian aroma dengan jarak yang dekat. Sensor gas ini menggunakan tipe *metal-oxide semiconductor* yaitu MQ2 dan MQ135, dan sensor ini masing-masing dipasang pada *end-effector* dan di samping kamera bagian depan robot. Gambar 2 menunjukkan skematik *hardware* pada *manipulator mobile robot*.

B. Perancangan Algoritma Fuzzy Logic

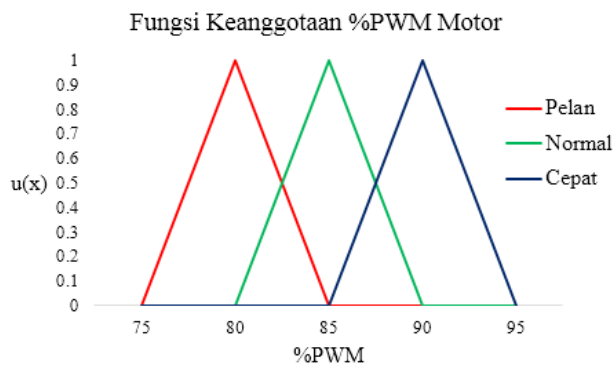
Fuzzy logic untuk pergerakan *mobile robot* menerima *input* dari kamera *wireless*, dimana hasil *capture* dibagi menjadi dua bagian yaitu bagian kiri (sensor S_1) dan kanan (sensor S_2). Nilai untuk sensor S_1 dan S_2 merupakan jumlah pixels yang berwarna hitam. Adapun pixels warna hitam diberi logika biner bernilai 1 dan pixels warna putih diberi nilai 0. Pada pixels yang berwarna hitam menunjukkan objek yang dideteksi oleh kamera. Adapun bagian *output* berupa nilai %PWM (*Pulse Width Modulation*) untuk mengatur kecepatan putaran motor kiri dan kanan. Proses *fuzzy logic* ini melalui tahapan fuzzifikasi, *rule base* dan *inference*, dan defuzzifikasi [11].

1. Tahap fuzzifikasi.

Pada tahap ini merancang fungsi keanggotaan untuk sensor S_1 dan S_2 . Adapun fungsi keanggotaan ini seperti



Gambar 3. Grafik fungsi keanggotaan untuk sensor



Gambar 4. Grafik fungsi keanggotaan untuk %PWM motor

ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3, nilai sensor mulai terbaca dari 0 sampai 180 pixels. Nilai pixels ini diperoleh dari hasil segmentasi dan memfilter *image* ke bentuk *grayscale* dan biner dengan penentuan nilai *threshold* [12].

2. Tahap *rule base* dan *inference*.

Berikutnya dibentuk *rule base* berdasarkan kombinasi dari sensor dan aksi pergerakan. *Rule base* ini juga perlu perancangan fungsi keanggotaan untuk aksi pergerakan yaitu %PWM motor kiri dan kanan. Gambar 4 menunjukkan grafik fungsi keanggotaan untuk %PWM motor. Adapun *rule base* ini sebanyak sembilan *rule* seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Pada pengambilan keputusan dalam menentukan keluaran *fuzzy* dengan menggunakan metode *max-min* [11].

3. Tahap defuzzifikasi.

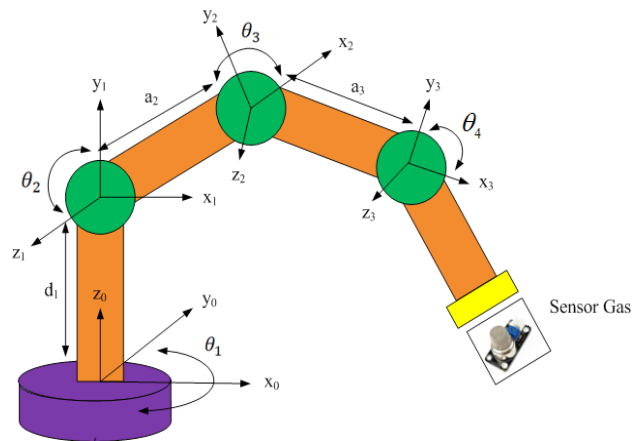
Selanjutnya mengkonversi dari keluaran *fuzzy* menjadi keluaran *crisp*. Metode konversi ini menggunakan *Centroid* [5], [11]. Nilai *crisp* ini ditransfer pada modul driver untuk mengendalikan kecepatan putar motor kiri dan kanan.

C. Perancangan Algoritma Trajectory Planning

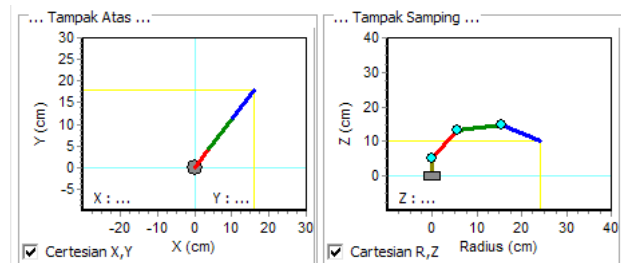
Perancangan *trajectory planning* ini perlu mengetahui arah dan derajat kebebasan pada *manipulator robot*. Pada penelitian ini menggunakan empat derajat kebebasan (4 DoF). Gambar 5 merupakan ilustrasi arah pergerakan dan

Tabel 1. *Rule base*

No.	Kamera		%PWM motor	
	Kiri (S1)	Kanan (S2)	Kiri	Kanan
1	Sedikit	Sedikit	Normal	Normal
2	Sedikit	Sedang	Pelan	Normal
3	Sedikit	Banyak	Normal	Cepat
4	Sedang	Sedikit	Normal	Pelan
5	Sedang	Sedang	Normal	Normal
6	Sedang	Banyak	Pelan	Normal
7	Banyak	Sedikit	Cepat	Normal
8	Banyak	Sedang	Normal	Pelan
9	Banyak	Banyak	Normal	Normal



(a)



(b)

(c)

Gambar 5. *Manipulator robot*, (a) arah pergerakan dan derajat kebebasan, (b) ilustrasi tampak atas, dan (c) tampak samping

derajat kebebasan *manipulator robot*. Robot ini memiliki masing-masing panjang link: $d_1=5\text{cm}$, $a_2=10\text{cm}$, $a_3=10\text{cm}$ dan $a_4=10\text{cm}$, sehingga total panjang link a sebesar 30 cm. Panjang link-link ini akan menentukan jangkauan robot dalam koordinat kartesian x , y dan z . *Manipulator robot* memiliki perumusan *forward kinematic* dan *invers kinematic* [8], [10].

Forward kinematic dapat dicari menggunakan aturan trigonometri, dan solusi akhir seperti pada (1). Adapun untuk mencari *invers kinematic* juga menggunakan aturan trigonometri dengan memperhatikan ilustrasi lengan pada Gambar 5. Solusi akhir dari *invers kinematic* ditunjukkan pada (2) sampai (6). Persamaan (2) untuk simbol ϕ merupakan sudut orientasi yang dibentuk sebesar -30° terhadap sumbu- x , dengan tujuan untuk memantapkan posisi *end effector* selalu menghadap objek.

Setelah diperoleh perumusan *forward* maupun *invers kinematic*, selanjutnya merancang pergerakan *manipulator robot* yang dapat mengikuti pola atau rute gerak dalam menginspeksi target. Pergerakan robot disesuaikan dengan koordinat x , y , dan z . *Manipulator robot* ini aktif jika *mobile robot* berada pada posisi dekat dengan objek yaitu sekitar 20cm dengan bantuan sensor jarak. Selama *manipulator robot* ini aktif dan menginspeksi objek sampai terdeteksi aroma gas yang diduga kuat sebagai kebocoran. *Manipulator robot* ini berhenti ketika sinyal *output* dari sensor gas melebihi *threshold* yang ditentukan, dan posisi *end-effector* pada sekitar target yang ditunjuk.

$$\begin{aligned} q_x &= C\theta_1 (a_2 C\theta_2 + a_3 C\theta_{23} + a_4 C\theta_{234}) \\ q_y &= S\theta_1 (a_2 C\theta_2 + a_3 C\theta_{23} + a_4 C\theta_{234}) \\ q_z &= d_1 + a_2 S\theta_2 + a_3 S\theta_{23} + a_4 S\theta_{234}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Q_{z1} &= \sqrt{(Q_x)^2 + (Q_y)^2} \\ P_x &= Q_{z1} - (a_4 \cdot c\phi) \\ P_y &= Q_z - d_1 - (a_4 \cdot s\phi), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{(P_x)^2 + (P_y)^2 - (a_2)^2 - (a_3)^2}{2a_2 a_3} \right), \quad (3)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{P_y}{P_x} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{a_3 \cdot s\theta_3}{a_2 + a_3 \cdot c\theta_3} \right), \quad (4)$$

$$\theta_4 = \phi - \theta_2 - \theta_3, \quad (5)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{Q_y}{Q_x} \right). \quad (6)$$

Pada penelitian ini digunakan metode *cubic trajectory* untuk pergerakan pada *manipulator robot*. *Cubic trajectory* merupakan persamaan polynomial orde tiga [10], seperti pada (7). Metode *cubic trajectory* ini menggunakan *input* koordinat kartesian x , y dan z . Sedangkan data *output* berupa sudut joint. Langkah selanjutnya menguraikan perumusan pada (7) untuk mendapatkan nilai a_0 , a_1 ,

a_2 dan a_3 , dan diperoleh solusi akhir seperti pada (8). Persamaan (8) diperoleh dengan memberikan nilai nol untuk kecepatan awal (v_s) dan akhir (v_f), dan terdiri dari simbol q_s , q_f , t , dan t_f . Adapun untuk q_s merupakan posisi awal, q_f posisi akhir, t yaitu waktu saat proses, dan t_f waktu mencapai posisi akhir. Persamaan (8) dapat dikembangkan untuk tiga koordinat kartesian x , y , dan z seperti pada (9), (10), dan (11). Nilai q_x , q_y , dan q_z merupakan koordinat dari *end-effector*.

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, \quad (7)$$

$$q(t) = q_s + 3 \left(\frac{q_f - q_s}{t_f^2} \right) t^2 - 2 \left(\frac{q_f - q_s}{t_f^3} \right) t^3, \quad (8)$$

$$q_x(t) = q_{xs} + 3 \left(\frac{q_{xf} - q_{xs}}{t_{xf}^2} \right) t^2 - 2 \left(\frac{q_{xf} - q_{xs}}{t_{xf}^3} \right) t^3, \quad (9)$$

$$q_y(t) = q_{ys} + 3 \left(\frac{q_{yf} - q_{ys}}{t_{yf}^2} \right) t^2 - 2 \left(\frac{q_{yf} - q_{ys}}{t_{yf}^3} \right) t^3, \quad (10)$$

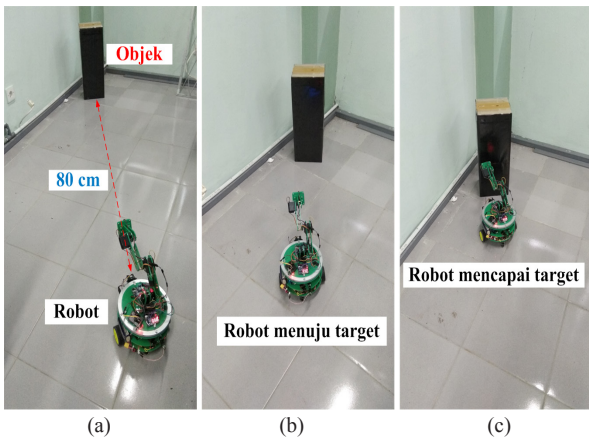
$$q_z(t) = q_{zs} + 3 \left(\frac{q_{zf} - q_{zs}}{t_{zf}^2} \right) t^2 - 2 \left(\frac{q_{zf} - q_{zs}}{t_{zf}^3} \right) t^3. \quad (11)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

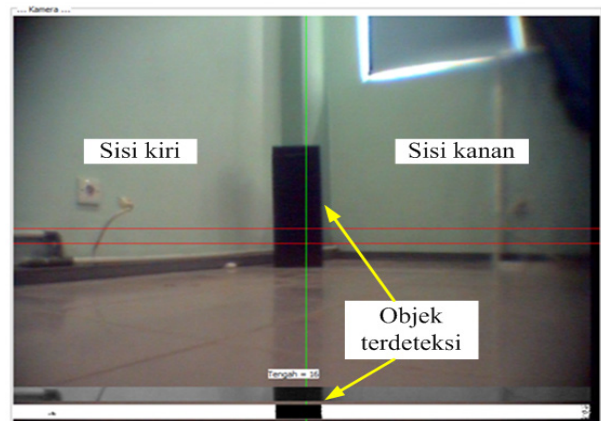
A. Pengujian Pergerakan Mobile Robot

Pada pengujian ini robot dan objek diletakkan pada arena dan tidak diberi halangan. Pada Gambar 6 merupakan pengujian robot dalam menuju target. Pada pengujian ini posisi awal robot dan objek berjarak 80cm dapat dilihat pada Gambar 6 (a). Robot menerima *input* dari kamera *wireless* yang ditransfer ke komputer untuk diproses dan menentukan aksi pergerakan menggunakan *fuzzy logic*.

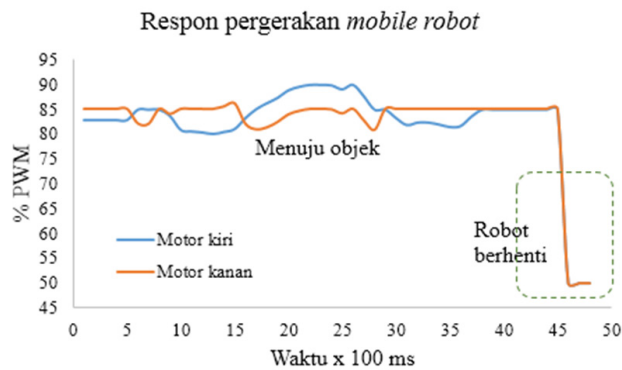
Fuzzy logic menerima data *input* dari kamera yang digunakan sebagai sensor deteksi objek. Objek yang ditampilkan dalam monitor dibagi menjadi dua bagian yaitu sisi kiri sebagai sensor S_1 dan sisi kanan sebagai sensor S_2 , hal ini dapat dilihat pada Gambar 7. Pada tahap ini dilakukan konversi dari citra berwarna menjadi citra



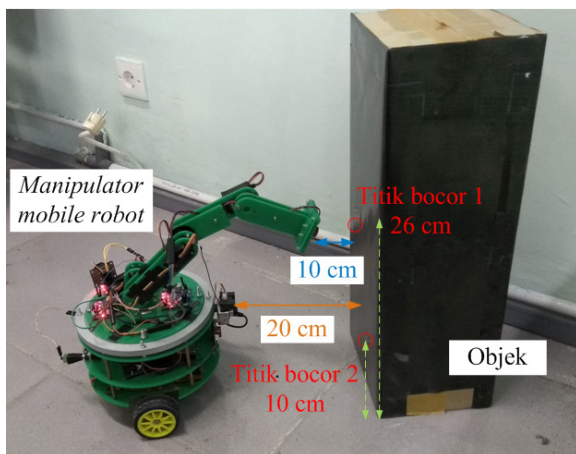
Gambar 6. Pengujian robot dalam menuju objek, (a) posisi awal, (b) menuju objek, dan (c) mencapai objek



Gambar 7. Tampilan objek yang terdeteksi oleh kamera



Gambar 8. Respon pergerakan robot menuju objek



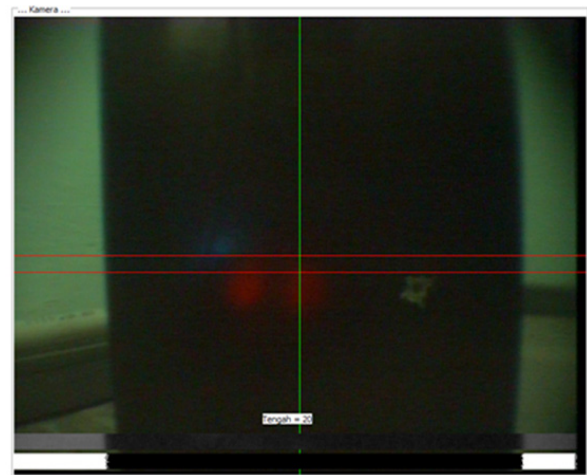
Gambar 9. Posisi origin end-effector saat inspeksi target

grayscale dan dikonversi lagi menjadi citra biner. Objek warna hitam akan tetap berwarna hitam sedangkan warna lainnya dianggap putih.

Adapun sensor S_1 dan S_2 masing-masing merupakan panjang pixel warna hitam yang ditentukan dari garis vertikal warna hijau dan horizontal warna merah. Nilai sensor S_1 dan S_2 mulai dari 0 sampai 180, nilai ini diperoleh dari jumlah pixels warna hitam dan dibagi dengan dua puluh. Nilai pixels ini digunakan sebagai input untuk fuzzy logic. Kemudian fuzzy logic memproses data sensor ini untuk pergerakan robot, dan data pergerakan berupa %PWM ditransfer kembali pada robot. Robot ini berhenti ketika posisi robot mendekati objek dengan jarak 20cm menggunakan sensor jarak. Pada Gambar 8 merupakan respon pergerakan robot dalam menuju objek. Berdasarkan pada Gambar 8, robot memiliki dua motor DC yaitu kiri dan kanan dimana perbedaan dari nilai %PWM motor kiri maupun kanan akan membentuk aksi belok kiri atau kanan.

B. Pengujian Pergerakan Manipulator Robot

Pada pengujian tahap ini dilakukan dengan mendekatkan mobile robot dan sensor jarak pada objek dengan jarak 20cm, dan jangkauan lengan manipulator 4 DOF tidak lebih dari 20cm arah horizontal maupun vertikal. Adapun end-effector pada manipulator dan objek berjarak 10cm. Gambar 9 merupakan posisi origin end-



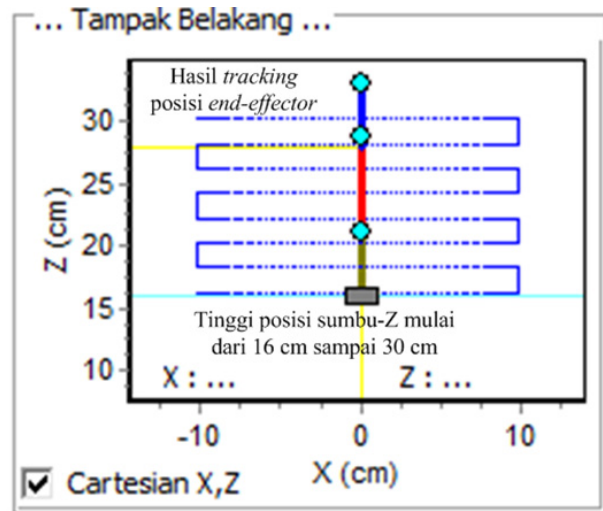
Gambar 10. Hasil capture pada objek dengan jarak dekat

Tabel 2. Koordinat untuk rute pergerakan manipulator

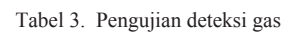
Titik	Koordinat (cm)			Keterangan
	X	Y	Z	
0	0	24	28	Origin
1	-10	20	30	Inspeksi
2	10	20	30	
3	10	20	28	
4	-10	20	28	
5	-10	20	26	
6	10	20	26	
7	10	20	24	
8	-10	20	24	
9	-10	20	22	
10	10	20	22	
11	10	20	20	
12	-10	20	20	
13	-10	20	18	
14	10	20	18	
15	10	20	16	
16	-10	20	16	
0	0	24	28	Origin

effector untuk inspeksi target yang diduga kebocoran gas. Gambar 10 menunjukkan hasil capture objek dengan jarak dekat. Posisi origin ini ditentukan di dalam database pada koordinat posisi $x=0$ cm, posisi $y=24$ cm, dan posisi $z=28$ cm.

Selanjutnya ditentukan rute pergerakan manipulator untuk meng-inspeksi objek sejauh jangkauan lengan. Adapun pola koordinat yang ditentukan seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Pertama manipulator aktif di posisi origin kemudian pergerakan ini menuju titik pertama, kedua dan seterusnya sampai selesai dan kembali lagi menuju posisi origin. Durasi waktu untuk pergerakan dari satu titik menuju ke titik yang lain yaitu 10 detik dengan interval perubahan waktu sebesar 100ms. Gambar 11 menunjukkan hasil pergerakan end-effector selama proses inspeksi. Pada saat dijalankan, awalnya manipulator bergerak



Gambar 11. Pergerakan *end-effector* selama proses inspeksi. (a) posisi tampak atas, dan (b) tampak belakang



Gambar 12. Respon sensor gas

Target	Koordinat yang terbaca (cm)			Keterangan
	X	Y	Z	
Titik bocor dengan tinggi 26 cm	-1	20	26	Terdeteksi oleh sensor gas MQ2 (<i>end-effector</i>)
	-7	20	26	
	-5	20	28	
	-3	20	28	
	-4	20	26	
	-2	20	28	
Titik bocor dengan tinggi 10 cm	7	20	16	Posisi <i>end-effector</i> saat gas terdeteksi oleh sensor gas MQ2 dan juga terdeteksi oleh sensor gas MQ135
	4	20	16	
	5	20	18	
	2	20	18	
	4	20	18	
	5	20	18	Tidak terdeteksi oleh sensor gas MQ135

C. Pengujian Deteksi Gas

Pada pengujian ini dimulai pada target bocor dengan tinggi 26cm. Aroma gas dapat terdeteksi oleh sensor MQ2 karena *end-effector* dekat dengan target. Pengujian

ini dilakukan sebanyak enam kali, dan sistem dapat mendeteksi adanya kebocoran gas dengan keberhasilan mencapai 100%. Selanjutnya pada titik bocor dengan tinggi 10cm. Pada posisi ini dilakukan pengujian deteksi gas dengan sensor MQ2 maupun sensor MQ135. Sensor MQ135 dapat mendeteksi kebocoran gas jika jarak antara robot dengan objek yaitu 15cm. Sehingga sensor MQ135 dapat mendeteksi adanya kebocoran gas untuk titik bocor yang lebih rendah. Pengujian ini juga dilakukan sebanyak enam kali dan gagal satu kali, dengan kata lain sistem juga berhasil mendeteksi kebocoran gas mencapai 83,33%. Berdasarkan pengujian pada dua titik bocor tersebut maka diperoleh tingkat keberhasilan rata-rata yaitu 91.67%. Adapun hasil pengujian dalam mendeteksi gas butana

pada dua posisi titik bocor tersebut ditunjukkan pada Tabel 3. Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 3, bahwa koordinat yang ditampilkan oleh sistem bervariasi pada titik bocor yang dituju dan selalu berubah posisi karena aroma gas bersifat menyebar. Di sisi lain disebabkan oleh sisa partikel gas yang masih menempel di dalam membran sensor. Oleh karena itu sensor gas terkadang mendeteksi aroma gas sebelum atau sesudah melalui posisi titik bocor. Namun posisi tersebut berada pada daerah di dekat *end-effector* dan masih dapat ditoleransi.

IV. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini telah dirancang *manipulator mobile robot* yang dilengkapi dengan dua buah sensor gas *metal-oxide semiconductor* dan kamera *wireless*. Robot ini memiliki fungsi untuk mendeteksi gas pada objek yang diduga kebocoran gas. Indikator adanya deteksi gas jika *output* dari sensor gas MQ2 mencapai 3 volt dan sensor gas MQ135 yaitu 2 volt. Pada instrumen pengujian terdapat dua titik bocor dengan posisi yang berbeda. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan bahwa robot dapat digunakan untuk mendeteksi kebocoran gas dengan menggunakan metode *fuzzy logic* untuk navigasi dan *cubic trajectory planning* untuk inspeksi. Aroma gas butana pada posisi titik bocor tersebut dapat dideteksi oleh sensor gas dengan keberhasilan mencapai 91,67%, dan posisi koordinat juga diketahui berdasarkan posisi akhir dari *end-effector*. Dalam pengembangan selanjutnya, robot ini akan diaplikasikan pada daerah yang luas dan pengenalan objek berbasis *image processing* dan *machine learning*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Sriwijaya yang telah memberikan dukungan dan finansial dalam penelitian ini.

REFERENSI

- [1] E. S. Redden, R. A. Pettit, C. B. Carstens, dan L. R. Elliott, "Scalability of Robotic Displays: Display Size Investigation", *Human Research and Engineering Directorate*, 2008.
- [2] A. D. C. Albornoz, A. B. Rodriguez, A. L. Lopez, dan A. R. G. Ramirez, "A Microcontroller-Based Mobile Robotic Platform for Odor Detection", *Biosignals and Biorobotics Conference*, 2012.
- [3] D. Herjuno, M. Rivai, dan T. A. Sardjono, "Teledeteksi Gas pada *Mobile Robot* yang Dikendalikan Gelombang Radio", *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 1, September 2012.
- [4] S. Nurmaini, B. Tutuko, dan A. Rahman, "A New Navigation of Behavior-Based Olfactory Mobile Robot", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 446-447, hal. 1255-1260, 2014.
- [5] N. L. Husni, A. S. Handayani, S. Nurmaini, dan I. Yani, "Odor Localization using Gas Sensor for Mobile Robot", *Proc. EECSI*, September 2017.
- [6] A. B. Gustica, M. Rivai, dan Tasripan, "Implementasi Sensor Gas pada Kontrol Lengan Robot untuk Mencari Sumber gas", *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 3, No. 1, 2014.
- [7] Firmansyah, Y. Away, R. Munadi, M. Ikhsan, dan I. Muddin, "Perancangan Lengan Robot 5 Derajat Kebebasan dengan Pendekatan Kinematika", *Jurnal Rekayasa Elektrika*, Vol. 11, No. 2, hal. 69-72, Oktober 2014.
- [8] M. F. Faris, A. Triwiyatno, dan I. Setiawan, "Perancangan Arm Manipulator 4 DOF Dengan Menggunakan Pengendalian Cartesian Space-Trajectory Planning", *Transient*, Vol. 1, No. 4, Desember 2012.
- [9] M. H. Barri, A. Ryandika, A. Cesario, dan A. Widyotriatmo, "Desain dan Kontrol Posisi dari Arm Manipulator Robot Sebagai Alat Rehabilitasi Pasien Pasca Stroke", *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, Vol. 9, No. 2, 2017.
- [10] Rendyansyah dan A. P. P. Prasetyo, "Simulasi Robot Manipulator 4 DOF Sebagai Media Pembelajaran Dalam Kasus Robot Menulis Huruf", *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, Vol. 5, No. 3, November 2016.
- [11] Fahmizal dan C. H. Kuo, "Development of a Fuzzy Logic Wall Following Controller for Steering Mobile Robots", *International Conference on Fuzzy Theory and Its Application*, December 2013.
- [12] R. D. Kusumanto dan A. N. Tomponu, "Pengolahan Citra Digital Untuk Deteksi Obyek Menggunakan Pengolahan Warna Model Normalisasi RGB", *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Komunikasi Terapan*, 2011.

Sistem Telemonitoring KWH Meter Menggunakan Modul Wi-Fi ESP8266 Berbasis Arduino Uno

Hidayat Nur Isnianto¹, Muhammad Arrofiq², Rijeqi Rahmawati³, dan Bagus Mulyo Tyoso³

¹Program Studi D-III Metrologi dan Instrumentasi

²Program Studi D-IV Teknologi Rekayasa Internet

³Program Studi D-III Teknik Elektro

Departemen Teknik Elektro dan Informatika Sekolah Vokasi UGM

Jln. Yacarana, Sekip Unit IV, Yogyakarta 55281

e-mail: hnisnianto@ugm.ac.id

Abstrak—Pembacaan KWH Meter pasca bayar oleh petugas terkadang terkendala untuk menjangkau fisik KWH Meter karena pagar rumah terkunci atau KWH Meter di dalam rumah. Hal ini sering kali menimbulkan permasalahan seperti kesalahan pembacaan dan petugas harus datang ke pelanggan beberapa kali. Oleh karena itu dibuat sistem telemonitoring KWH Meter melalui jaringan WiFi secara online untuk membantu petugas pencatat pemakaian listrik pada konsumen. Sistem ini menggunakan sensor arus ACS712, sensor tegangan ZMPT101B, sensor beda fase, RTC DS1307 sebagai pengatur waktu dan tanggal, Arduino sebagai pemroses data, mikro SD Card untuk menyimpan data tanggal, jam, dan pembacaan sensor, LCD sebagai penampil, dan dipancarkan dengan modul Wi-Fi ESP8266 ke *smartphone* atau PC dengan tampilan web sederhana. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa semua komponen dapat berfungsi dengan baik. Sensor arus ACS712 30A memiliki rerata *error* 1%, sensor tegangan ZMPT101B mampu melakukan pembacaan tegangan dalam kondisi berbeban maupun tanpa beban dengan rerata *error* 0,5%, dan sensor beda fase memiliki rerata *error* 1% untuk beban resistif dan 4,2% untuk beban induktif lampu TL. Pengukuran daya mempunyai rerata *error* 1,3% untuk beban lampu pijar 75 W dan setrika 300 W. Jarak pancaran modul Wi-Fi ESP8266 maksimal 15 meter saat tidak terhalang dan 10 meter saat terhalang. Semua data hasil pengukuran dapat disimpan pada SD Card.

Kata kunci: *KWH meter, telemonitoring, real time, SD card, Arduino, ESP8266*

Abstract—The postpaid KWH Meter reading by officers is sometimes constrained to reach the physical KWH Meter because the house fence is locked or the KWH Meter is inside the house. This often causes problems such as reading errors and the officer must come to the customer several times. Therefore a telemonitoring system for KWH Meters is made through an online WiFi network to help officers record electricity usage for consumers. This system uses ACS712 current sensor, ZMPT101B voltage sensor, different phase sensor, RTC DS1307 as a timer and date, Arduino as a data processor, Micro SD Card for storing date, time, and sensor readings, LCD as a viewer, and transmitted with modules ESP8266 Wi-Fi to a *smartphone* or PC with a simple web display. The test results show that all components can function properly. ACS712 30A current sensor has an average error of 1%, the ZMPT101B voltage sensor is capable of carrying out voltage readings in load or no load conditions with an average error of 0.5%, and a different phase sensor has an average error of 1% for resistive load and 4.2% for inductive loads of TL lights. Power measurements have an average error of 1.3% for 75W incandescent lamp loads and 300W irons. The ESP8266 Wi-Fi module emits a maximum of 15 meters when not blocked and 10 meters when blocked. All measurement data can be stored on the SD Card.

Keywords: *KWH meter, telemonitoring, real time, Arduino, SD card, ESP8266*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektroika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

KWH Meter digunakan untuk menghitung besarnya energi listrik yang dipakai pada konsumen perumahan atau industri untuk setiap jamnya dan dikalkulasikan dengan harga listrik yang harus dibayarkan. KWH meter hanya menghitung daya aktif pada suatu perumahan atau industri

sehingga apabila ada daya reaktif yang ditimbulkan oleh beban kapasitif atau induktif, maka KWH meter tidak dapat menghitung daya tersebut [1].

Jenis KWH meter yang beredar di Indonesia, ada dua yaitu tipe mekanik dan digital. Tipe mekanik adalah peralatan yang menghitung daya listrik dengan menghitung putaran atau rotasi piringan aluminium di

KWH meter. Kecepatan piringan aluminium menandakan besarnya daya yang sedang digunakan oleh konsumen. Sedangkan KWH meter jenis digital menggunakan rangkaian elektronik sebagai penghitungnya [1].

Pencatatan pemakaian listrik yang terjadi pada pelanggan seringkali menimbulkan permasalahan karena adanya kesalahan dalam pembacaan maupun pencatatan. Hal ini disebabkan karena terkendala dengan medan untuk menjangkau fisik KWH Meter pelanggan (pagar rumah terkunci, KWH Meter di dalam rumah) [5]–[7], [10].

II. STUDI PUSTAKA

Sistem pengukuran otomatis pada KWH meter satu fase melalui teknologi wireless GSM telah diimplementasikan untuk menghitung biaya tagihan dan merekam semua data penagihan sebelumnya secara berkala sehingga mendapatkan siklus penagihan yang pasti. Data ini dapat dikonversi ke format PDF. Hal ini sangat berguna untuk menentukan pola konsumsi energi [2].

Implementasian teknologi GSM untuk pengukuran energi listrik pada konsumen dengan hasil dapat dicetak melalui printer termal. Sistem ini mengintegrasikan meter energi digital yang terpasang di unit konsumen dengan sistem pemantauan energi perusahaan listrik. Meter digital listrik fase tunggal atau tiga fasa dapat digunakan untuk mengambil pembacaan data meter. Dengan GSM digunakan untuk mentransmisikan penggunaan energi dengan bantuan SMS [3].

Sistem monitoring jarak jauh secara nirkabel terhadap konsumsi energi dari beberapa peralatan listrik pada konsumen perumahan yang dioperasikan dari komputer pusat dengan jaringan sensor nirkabel menggunakan standar IEEE 802.15.4 dengan perangkat ZigBee. Uji kinerja menunjukkan bahwa prototipe yang dikembangkan mampu memberikan pengukuran dengan akurasi dan presisi yang sangat baik untuk tegangan dan arus [4].

Pengukuran energi listrik berbasis android melalui jaringan GSM diterapkan untuk mendapatkan sistem penagihan listrik otomatis. Hal ini bertujuan untuk mengukur dan memantau listrik yang dikonsumsi oleh konsumen di wilayah setempat dan mentransmisikan daya yang dikonsumsi ke stasiun serta mengeluarkan tagihan daya yang dikonsumsi secara otomatis. Hal ini juga bertujuan untuk menemukan malpraktek di meter [5].

Sistem pembacaan besaran listrik secara otomatis dapat diimplementasikan melalui jaringan GSM, karena aplikasi ini tidak memerlukan kecepatan data kecepatan tinggi, perlu bertenaga rendah, biaya rendah, jarak jauh, dan nirkabel. Sistem ini untuk mengatasi kekurangan teknologi pembacaan meteran listrik konvensional [6].

Teknologi e-metering (*Electronic Metering*) digunakan untuk menggantikan metode pembacaan meter konvensional dan memungkinkan akses jarak jauh dari meteran energi yang ada oleh penyedia energi juga dapat memantau pembacaan meter secara teratur tanpa orang yang mengunjungi setiap rumah. Sistem pengukuran energi dan perhitungan biaya berbasis GSM melalui

SMS. Setelah memproses data yang terkumpul, tagihan dihasilkan dan menggunakan perangkat lunak berbasis web, dikirim kembali ke pelanggan sebagai SMS [7].

Sistem pemantauan energi secara *real time* di Level 17, Tower 2, Kompleks Teknik, Universiti Teknologi MARA (UiTM) Malaysia dengan perangkat arduino, modul Wi-Fi ESP8266, dan sensor. Data hasil pengukuran disimpan di server web emoncms.org dan ditampilkan secara *real time* meliputi konsumsi energi, biaya, dan emisi CO₂ dengan komunikasi secara *wireless* dengan Wi-Fi. Hasil pengujian menunjukkan kesalahan rata-rata 2,04% dibandingkan dengan meteran komersial [8].

Implementasi KWH meter untuk rumah tinggal berbasis Arduino terdiri dari sensor arus ACS712 dan modul GSM SIM800L. Hasilnya menunjukkan bahwa ketika meteran dinyalakan-ON tanpa beban outputnya 0,00kWh, beban laptop Dell Inspiron i-core7, output 10,75 kWh semua diamati pada aplikasi web awan secara *real time* [9].

Penelitian tentang monitoring, pengendalian, dan pembacaan meteran energi pada konsumen melalui jaringan ZigBee untuk konsumsi energi dilakukan dengan memodifikasi meteran elektromekanik tradisional. Hasilnya adalah mampu membaca secara otomatis dan mengirimkan datanya melalui komunikasi nirkabel ke stasiun pangkalan untuk monitoring dan analisis data dari meteran energi konsumen, sehingga menghindari kesalahan pembacaan secara manual [10].

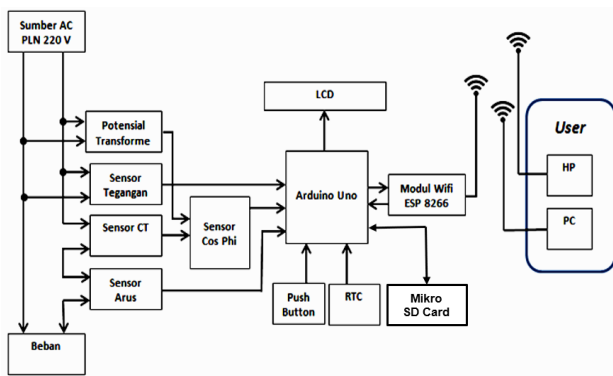
Implementasi sistem monitoring konsumsi daya listrik oleh konsumen berbasis Arduino Uno dan Raspberry Pi dengan perhitungan biaya pemakaian beban dan menampilkan informasi konsumsi daya beban dari konsumen seperti: tegangan, arus, faktor daya, sifat beban, jenis beban, daya, distorsi volt-ampere, distorsi faktor daya, THD, bentuk gelombang arus dan tegangan, serta spektrum frekuensi harmoniknya sebagai *smart energy meter* (SEM) sebagai transparansi konsumsi energi oleh konsumen untuk strategi tarif. Dengan sensor arus ZMCT103C, sensor tegangan ZMPT101B, dan sensor getar SW420 untuk keamanan. Kesalahan pengukuran sensor tegangan, arus, dan faktor daya adalah 0,8%, 1,5%, dan 1,0% [11].

Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan sistem *telemonitoring* KWH Meter melalui LCD (*Liquid Crystal Display*) yang terdapat pada KWH Meter maupun diakses melalui *web* sederhana dari jarak tertentu melalui jaringan nirkabel menggunakan modul WiFi ESP8266. Dengan demikian diharapkan pembacaan dan pencatatan data KWH Meter secara *real time*, mudah, dan tidak memberikan persepsi yang berbeda antara pelanggan dan petugas pencatat meter dari PLN.

III. METODE

A. Blok Diagram Sistem

Desain dan implementasi sistem *telemonitoring* KWH Meter yang dibuat terdiri dari bagian pengirim



Gambar 1. Diagram blok sistem

dan penerima. Di bagian pengirim terdapat sensor yang terintegrasi dengan Arduino Uno dan Wi-Fi ESP8266 untuk memancarkan sinyal. Hasil pancaran ini dapat diterima oleh PC atau HP untuk menampilkan data-data dari KWH Meter sehingga dapat dimonitor secara *real time*. Blok diagramnya seperti pada Gambar 1.

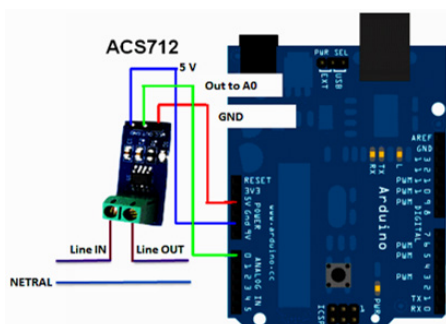
Cara kerja dari sistem ini adalah mengukur tegangan, arus, faktor daya, dan waktu. Hasil pengukuran diolah oleh Arduino Uno dengan perhitungan matematis untuk mendapatkan daya dan energi. Data pengukuran tegangan, arus, faktor daya, daya, dan energi dalam setiap detiknya serta data waktu dan tanggal yang diambil dari RTC dikirim ke PC atau *smartphone* dan ditampilkan dalam format web secara *real time* dan *up to date*. Pelanggan juga dapat memantau informasi tegangan, arus, faktor daya, daya, dan energi yang dihasilkan melalui *smartphone*, PC, atau LCD (*Liquid Crystal Display*) pada KWH Meter yang terpasang.

B. Sensor Arus ACS 712

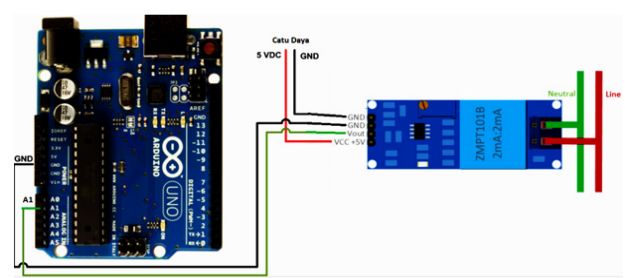
Sensor arus ACS 712 digunakan untuk mengukur besaran arus yang melewatinya. Sensor ini mengirim data analog ke yang ADC (*Analog to Digital Converter*) Arduino Uno sehingga diperoleh data arus. Konfigurasi sensor arus ACS 712 dengan Arduino Uno seperti pada Gambar 2.

C. Sensor Tegangan ZMPT 101B

Sensor tegangan ZMPT 101B digunakan untuk membaca besaran tegangan AC pada jaringan listrik



Gambar 2. Konfigurasi sensor arus ACS 712 dengan Arduino Uno



Gambar 3. Konfigurasi sensor tegangan ZMPT101B dengan Arduino Uno

PLN. Sensor ini terhubung ke ADC pada Arduino Uno. Konfigurasi sensor tegangan ZMPT 101B dengan Arduino Uno ditunjukkan pada Gambar 3.

D. Modul WiFi ESP 8266

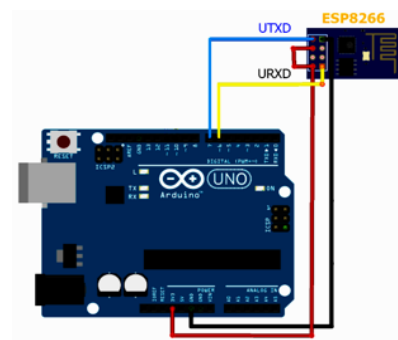
Modul WiFi ESP 8266 digunakan untuk mengunggah data dari hasil perhitungan sensor ke dalam web berbasis html. Modul WiFi ESP 8266 juga sebagai *server* untuk melayani *client* dalam proses *monitoring*. Konfigurasi modul WiFi ESP8266 dengan Arduino Uno ditunjukkan pada Gambar 4.

E. RTC DS 1307

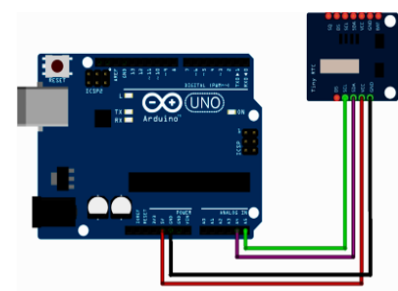
RTC DS 1307 adalah modul untuk memberikan data waktu dan tanggal ke Arduino Uno. Konfigurasi RTC DS 1307 dengan Arduino Uno dapat dilihat pada Gambar 5.

F. Untai Faktor Daya

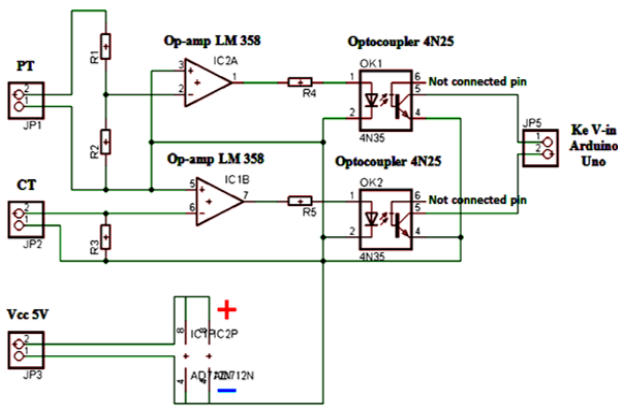
Untai faktor daya berfungsi sebagai pengukur beda fase pada beban induktans atau reaktans. Untai ini menggunakan



Gambar 4. Konfigurasi modul WiFi ESP8266 dengan Arduino Uno



Gambar 5. Konfigurasi RTC DS 1307 dengan Arduino Uno

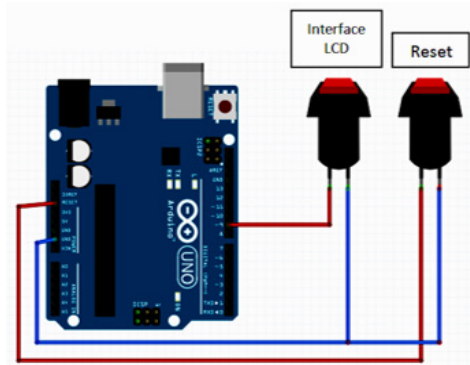


Gambar 6. Skematik sensor faktor daya

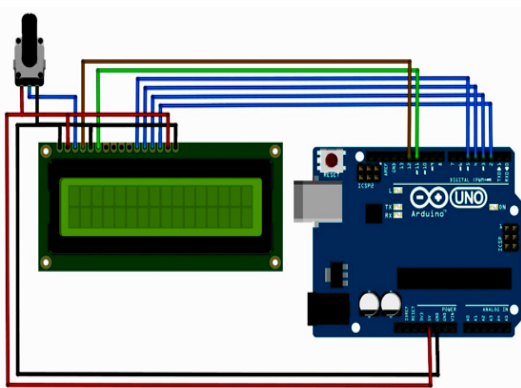
transformator tegangan (PT) untuk membaca gelombang tegangan dan transformator arus (CT) untuk membaca gelombang arus. Gelombang tersebut kemudian dideteksi nilai nolnya dengan op-amp LM 358 sebagai *zero crossing detector* (ZCD) yang outputnya gelombang kotak aktif *high*. Optocoupler 4N25 untuk mengubah menjadi aktif *low*. Untai detektor faktor daya seperti pada Gambar 6.

G. Push Button

Push button digunakan sebagai reset dengan cara dihubungkan dengan pin GND untuk mereset secara langsung pada pin Arduino Uno. Sedangkan *push button* sebagai pemilih menu tampilan LCD dihubungkan pada



Gambar 7. Rangkaian Push Button dengan Arduino Uno sebagai interface LCD dan reset



Gambar 8. Konfigurasi LCD dengan Arduino Uno

Tabel 1. Hasil pengukuran tegangan keluaran catu daya

Beban	Hasil Pengukuran Sebelum Tanpa Beban (VDC)	Hasil Pengukuran Berbeban (VDC)	Drop Voltage
Arduino	7.04	6.99	0,7 %
LCD	5.02	4.99	0,59 %
Sensor Cos Phi	5.00	4.97	0,6 %
Sensor Tegangan	5.01	4.98	0,59 %
Modul Wi-Fi	3.32	3.29	0,9 %

pin 9 Arduino Uno seperti pada Gambar 7.

H. LCD

LCD berfungsi untuk menampilkan informasi atau data pada *user* dan terhubung dengan Arduino Uno untuk menampilkan apapun yang diolah dan ditampilkan sesuai dengan program pada Arduino Uno. Adapun konfigurasi LCD dengan Arduino Uno ditunjukkan pada Gambar 8.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Catu Daya

Catu daya terdiri dari 3 komponen *voltage regulator* LM 7805 yang masing-masing mengeluarkan tegangan 5 volt serta mencatu maksimal dua komponen. Pengujiannya menggunakan *digital multimeter* CADIK dengan range 20 Volt DC dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1.

B. Pengujian Sensor Arus ACS 712 30A

Hasil pengukuran sensor arus ACS 712 30A dibandingkan dengan hasil pengukuran *ampere meter* HELES menggunakan dua jenis beban seperti pada Tabel 2.

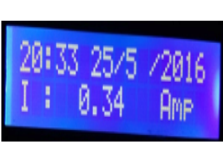
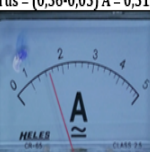
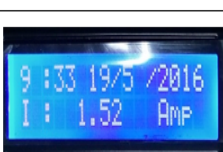
Tabel 2 menunjukkan bahwa sensor arus ACS 712 30A dalam keadaan baik, dibuktikan dengan hasil pembacaan sensor arus dengan alat ukur konvensional multimeter HELES mempunyai faktor kesalahan rata-rata 6% saat berbeban dan 0% saat tanpa beban.

C. Pengujian Sensor Tegangan ZMPT 101B

Hasil pengujian sensor tegangan ZMPT 101B dibandingkan dengan multimeter digital HELES dan multimeter analog HELES ditunjukkan pada Tabel 3.

Dari hasil pengujian pada Tabel 2 menunjukkan bahwa antara sensor tegangan ZMPT 101B dengan alat ukur konvensional Multimeter HELES mempunyai faktor kesalahan rata-rata 0,55%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor tegangan ZMPT 101B ini dalam kondisi baik.

Tabel 2. Pengujian Sensor Arus ACS712 30 A dengan beban

Beban	Hasil Pengukuran dengan		Faktor Kesalahan
	Multimeter HELES	Sensor ACS712 30 A	
Tanpa Beban	 Arus = 0,05 A	 I : 0.05 Amp	0%
Lampu Pijar	 Arus = (0,36-0,05) A = 0,31 A	 I : 0.34 Amp	8,8 %
Setrika Philips	 Arus = (1,52-0,05) A = 1,47 A	 I : 1.52 Amp	3,2%

D. Pengujian Untai Faktor Daya

Hasil pengujian dibandingkan dengan alat ukur konvensional faktor daya merk YOKOGAWA dengan beban resistif murni dan induktif seperti pada Tabel 4.

Dari Tabel 4. terlihat bahwa antara sensor faktor daya dengan alat ukur konvensional *Faktor daya* Meter YOKOGAWA mempunyai *error* 0% untuk beban resistif maupun induktif, kecuali untuk beban lampu TL *error* mencapai 4,2%. Hal ini dikarenakan ballas pada lampu TL sudah terlalu lama.

E. Pengujian Daya Listrik

Pengujian daya digunakan beban induktif yaitu setrika PHILIPS 300 Watt dan beban resistif lampu pijar 75 Watt. Hasil dari pengujian daya listrik menggunakan alat ini dibandingkan dengan alat ukur konvensional Watt Meter

Tabel 3. Hasil pengujian sensor tegangan ZMPT 101B

Hasil Pengukuran dengan Multimeter HELES	Hasil Pengukuran dengan Sensor ZMPT 101B	Faktor Kesalahan
	 U : 223.80 volt	0,8 %
 V = 215 Volt	 U : 215.67 volt	0,3 %

Tabel 4. Hasil pengujian sensor faktor daya

Beban	Hasil Pengukuran dengan Cos Phi meter YOKOGAWA	Hasil Pengukuran dengan Sensor Cos Phi	Faktor Kesalahan(%)
Lampu Pijar	 Cos Phi : 1	 PF : 1.00	0 %
Setrika PHILIPS	 Cos Phi = 0,99	 PF : 0.99	0 %
Lampu TL Philips	 Cos Phi = 0,91	 PF : 0.95	4,2 %

De Lorenzo dapat dilihat pada Tabel 5.

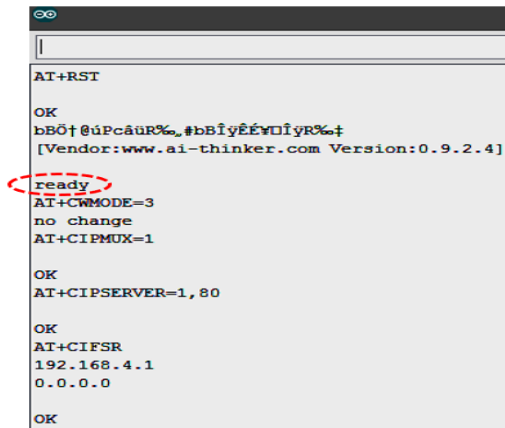
Dari Tabel 5. dapat dibandingkan antara sistem pada alat ini dan alat ukur konvensional Watt Meter De Lorenzo mempunyai faktor kesalahan yang kurang dari 5%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa sistem ini dapat bekerja dengan baik dan sesuai dengan perintah.

F. Pengujian Modul WiFi ESP8266

Modul WiFi ESP 8266 berperan sebagai pengirim

Tabel 5. Pengujian daya listrik

Beban	Hasil Pengukuran daya dengan Watt Meter De Lorenzo	Hasil Pengukuran daya dengan sistem alat ini	Faktor Kesalahan Alat
Lampu Pijar Philips 75W	 Range Tegangan = 300V Range Arus = 3A Faktor Pengali = 300 Hasil = 0,23 x 300 = 69 W Faktor kesalahan terhadap name plate beban = 8 %	 P : 76.18 Watt	1,5 %
Setrika Philips 300W	 Range Tegangan = 300V Range Arus = 3A Faktor Pengali = 300 Hasil = 1 x 300 = 300 W Faktor kesalahan terhadap name plate beban = 0 %	 P : 303.38 Watt	1,1 %



Gambar 9. Pengujian cek status Modul WiFi ESP 8266

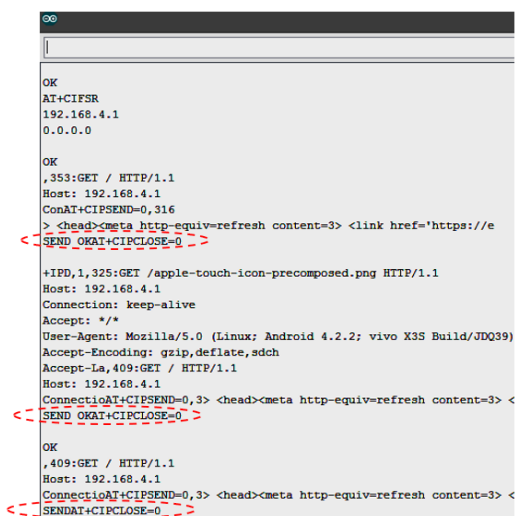
informasi data dari KWH Meter ke *user* yang dapat diakses melalui *smartphone* atau PC. Pengujian modul WiFi ESP8266 dilakukan dengan 2 tahapan yaitu: memeriksa status kesiapan modul WiFi ESP 8266 dan melihat keberhasilan pengaksesan data.

Memeriksa status modul WiFi ESP 8266 dilakukan untuk mengetahui apakah modul WiFi ESP 8266 sudah siap untuk digunakan sebagai media dalam pengaksesan data. Hasil ditampilkan pada *serial monitor* Arduino Uno IDE yang ditunjukkan pada Gambar 9.

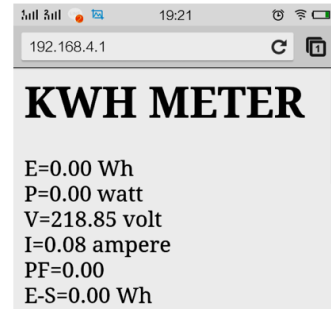
Pada Gambar 9 terlihat bahwa modul WiFi ESP 8266 berstatus *READY* atau dengan kata lain modul siap untuk mengirimkan data dan dapat diakses sebagai *server* atau *client*. Keberhasilan pengaksesan data melalui modul WiFi ESP 8266 dapat diketahui saat *IP address* dapat diakses oleh *user*. Hasil ditampilkan pada *serial monitor* Arduino Uno IDE seperti pada Gambar 10.

Pada Gambar 10 terlihat bahwa modul WiFi ESP 8266 dapat diakses sebagai *server* atau *client* yang ditunjukkan pada program *AT-Command* AT+CWMODE = 3, dan data-data yang dikirimkan oleh modul WiFi ESP 8266 dapat diakses melalui alamat *IP address* 192.168.4.1.

Keberhasilan pengaksesan data dapat ditandai dengan munculnya *AT-Command* berupa SEND OK dan



Gambar 10. Pengujian keberhasilan akses modul ESP 8266



Gambar 11. Hasil akses dengan Modul WiFi ESP 8266 dengan HP

AT+CIPCLOSE=0 pada *serial monitor* Arduino Uno IDE seperti pada Gambar 10. Sedangkan hasil pengaksesan data-data KWH Meter melalui modul WiFi ESP 8266 yang telah diakses *user* dengan ponsel seperti Gambar 11.

Pada Gambar 11 merupakan tampilan web berisi data KWH Meter pada saat dilakukan *monitoring* oleh *user*. Alamat *IP address* yang tersedia dapat diakses dengan ponsel *user* sesuai dengan yang diinginkan. Jadi dengan demikian modul WiFi ESP8266 dapat mengirimkan data dan dapat diakses dengan baik.

G. Pengujian KWH Meter

Pengujian ini dengan KWH Meter sebenarnya dilakukan dengan menggunakan beban sebanyak sepuluh lampu pijar masing-masing berdaya 50W dan KWH Meter fasa tunggal dua kawat kelas dua dari PLN dengan jenis FA14AI1Z (900 putaran/kWh). Pengujian dilakukan selama 12 menit atau setara dengan bertambahnya 0,1 kWh dengan beban 500W. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.

Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa pengujian alat dengan KWH Meter sebenarnya dapat menampilkan hasil yang sama dalam pengujian selama 12 menit, yaitu sebesar 0,1 kWh. Sehingga dalam pengujian ini antara alat dengan KWH Meter sebenarnya terdapat *error* sebesar 0%.

H. Pengujian Jarak Jangkauan Modul WiFi ESP 8266

Pada pengujian jarak jangkauan modul WiFi ESP 8266 dilakukan pengujian dalam kondisi terhalang dan tidak terhalang. Hasil pengujian seperti pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Dari Tabel 6 dan Tabel 7 terlihat bahwa jarak pancaran modul WiFi ESP 8266 dengan piranti pengakses maksimal 15 meter saat kondisi tidak terhalang dan 10 meter saat kondisi terhalang.

I. Pengujian Micro SD Card

Micro SD digunakan untuk menyimpan data pembacaan sensor arus, tegangan, faktor daya, tanggal, jam, dan penggunaan beban berdasarkan waktu yang telah ditentukan, sehingga dapat mengetahui histori pada beban. Hasil pengujian pengujian Micro SD dengan menggunakan *serial monitor* IDE Arduino ditunjukkan pada Gambar 12.

Tabel 5. Pengujian alat dengan KWH Meter sebenarnya

KWH Meter Sebenarnya		
Perhitungan	Waktu	Gambar
Daya : $50W \times 10 = 500W$ Energy : $500W \times 0,2 \text{ jam} = 100 \text{ Wh} = 0,1 \text{ kWh}$	720 detik = 12 menit = 0,2 jam   Waktu = 12 menit	  (0,5 - 0,4) kWh = 0,1 kWh
KWH Meter (Alat)		
Perhitungan	Waktu	Gambar
Daya : $50W \times 10 = 500W$ Energy : $500W \times 0,2 \text{ jam} = 100 \text{ Wh} = 0,1 \text{ kWh}$	720 detik = 12 menit = 0,2 jam   Waktu = 12 menit	  (100-0) $\times 10^{-3} = 0,1 \text{ kWh}$

Tabel 6. Hasil pengujian jarak Wifi ESP 8266 kondisi tidak terhalang

Jarak Jangkauan	Koneksi	Keterangan
Tidak Terhalang 0 CM 0 M	Wi-Fi Connected to ESP_F45870 Scan Choose a network ✓ ESP_F45870	Dengan jarak 0 m tanpa halangan, koneksi WiFi mempunyai sinyal yang sangat baik
Tidak Terhalang 500 CM 5 M	Wi-Fi Connected to ESP_F45870 Scan Choose a network ✓ ESP_F45870	Dengan jarak 5 m tanpa halangan, koneksi WiFi mempunyai sinyal yang baik
Tidak Terhalang 1000 cm 10 m	Wi-Fi Connected to ESP_F45870 Scan Choose a network ✓ ESP_F45870	Dengan jarak 10 m tanpa halangan, sinyal koneksi WiFi satu tingkat melemah dari kondisi full
Tidak Terhalang 1500 cm 15 m	Wi-Fi Connected to ESP_F45870 Scan Choose a network ✓ ESP_F45870	Dengan jarak 15 m tanpa halangan, sinyal koneksi WiFi melemah dua tingkat dari kondisi full
20 meter atau lebih	Wi-Fi Connected to ESP_F45870 Scan Choose a network ✓ ESP_F45870	Dengan jarak 20 m tanpa halangan, WiFi masih terdeteksi namun sinyal koneksi tidak ada

Dari Gambar 12 pada SD Card akan menyimpan data dalam format *.csv yang merupakan histori pemakaian beban. File csv yang disimpan pada Micro SD dapat ditampilkan ke dalam format Microsoft Excel seperti pada

Tabel 7. Hasil pengujian jarak Wifi ESP 8266 kondisi terhalang

Jarak Jangkauan	Koneksi	Keterangan
Terhalang 0 CM 0 M	Wi-Fi Connected to ESP_F45870 Scan Choose a network ✓ ESP_F45870	Dengan jarak 0 m dengan halangan, koneksi WiFi mempunyai sinyal yang sangat baik
Terhalang 500 CM 5 M	Wi-Fi Connected to ESP_F45870 Scan Choose a network ✓ ESP_F45870	Dengan jarak 5 m dengan halangan, sinyal koneksi WiFi satu tingkat melemah dari kondisi full
Terhalang 1000 CM 10 M	Wi-Fi Connected to ESP_F45870 Scan Choose a network ✓ ESP_F45870	Dengan jarak 10 m dengan halangan, sinyal koneksi WiFi dua tingkat melemah dari kondisi full
Terhalang 1500 CM 15 M	Wi-Fi Obtaining IP address-- Scan Choose a network ESP_F45870	Dengan jarak 15 m dengan halangan, WiFi terdeteksi namun susah terkoneksi dan sinyal koneksi tidak ada
20 meter atau lebih	Wi-Fi Obtaining IP address-- Scan Choose a network ESP_F45870	Dengan jarak 20 m dengan halangan, WiFi terdeteksi namun susah terkoneksi dan sinyal koneksi tidak ada

Gambar 13.

Dari Gambar 13, maka histori beban dapat diketahui dengan lebih mudah dan dapat langsung dicetak atau dapat dibuat dalam bentuk grafik untuk mengetahui *trend* pemakaian beban dalam periode waktu tertentu.

A. Mengakses IP Address dari Modul WiFi ESP 8266

Dalam kegiatan *monitoring* dengan cara mengakses *IP address* Wifi ESP 8266 dengan piranti yang akan digunakan untuk *monitoring* dengan sinyal wifi yang terdeteksi. Gambar 14 menunjukkan piranti berupa ponsel yang terhubung dengan sinyal wifi dari modul ESP 8266.

COM14 (Arduino/Genuino Uno)	
No	Tanggal, Jam, Tegangan, Arus, Beban, Cosh phi
1	Jum'at17/6/2016, 2:1, 194.22, 2.15, 48.52, 0.12
2	Jum'at17/6/2016, 2:1, 192.44, 2.01, 50.11, 0.13
3	Jum'at17/6/2016, 2:1, 191.82, 1.97, 47.47, 0.13
4	Jum'at17/6/2016, 2:1, 190.10, 1.93, 48.24, 0.13
5	Jum'at17/6/2016, 2:1, 192.40, 1.90, 52.98, 0.14
6	Jum'at17/6/2016, 2:1, 194.82, 1.88, 53.34, 0.15
7	Jum'at17/6/2016, 2:1, 191.53, 1.88, 50.90, 0.14
8	Jum'at17/6/2016, 2:1, 193.52, 1.88, 51.44, 0.14
9	Jum'at17/6/2016, 2:1, 192.63, 1.86, 51.52, 0.14
10	Jum'at17/6/2016, 2:1, 190.03, 1.89, 53.30, 0.15
11	Jum'at17/6/2016, 2:1, 193.00, 1.87, 50.02, 0.14
12	Jum'at17/6/2016, 2:1, 192.62, 1.87, 52.01, 0.14
13	Jum'at17/6/2016, 2:1, 192.24, 1.86, 47.03, 0.13
14	Jum'at17/6/2016, 2:1, 192.04, 1.87, 49.75, 0.14
15	Jum'at17/6/2016, 2:1, 191.85, 1.88, 54.15, 0.15
16	Jum'at17/6/2016, 2:1, 193.53, 1.87, 43.05, 0.12
17	Jum'at17/6/2016, 2:1, 192.86, 1.88, 53.88, 0.15
18	Jum'at17/6/2016, 2:1, 192.81, 1.88, 51.72, 0.14
19	Jum'at17/6/2016, 2:1, 194.02, 1.87, 53.95, 0.15
20	Jum'at17/6/2016, 2:1, 190.57, 1.88, 48.07, 0.13

Gambar 12. Pengujian Micro SD Card dengan Serial Monitor

Gambar 13. Pengujian Micro SD di tampilkan ke Excel



Gambar 14. Pengkoneksian ponsel dengan sinyal Wifi yang tersedia

Setelah piranti terkoneksi dengan sinyal wifi (*connected*) yang ditunjukkan pada Gambar 14, maka langkah selanjutnya yaitu mengakses IP address yang ditentukan oleh modul Wifi ESP 8266.

Saat IP address 192.168.4.1 diakses, maka akan muncul tampilan web sederhana yang menampilkan status KWH Meter secara keseluruhan tanpa menekan tombol apapun untuk melakukan *reload*, karena *reload* sudah dilakukan secara otomatis oleh sistem. Hal tersebut ditujukan agar tampilan status KWH Meter selalu *update* dengan kondisi beban yang ada. Gambar 15 menunjukkan tampilan web sederhana hasil pengaksesan IP address 192.168.4.1.

Perbandingan status KWH Meter yang diakses melalui dua cara yaitu tampilan visual langsung melalui LCD dan

Gambar 15. Tampilan web sederhana status KWH Meter

Tabel 8. Perbandingan hasil status KWH Meter dengan dua macam akses

Hasil tampilan dari LCD	Hasil Tampilan web
15:18 22/5 /2016 W : 4.65 wH	192.168.4.1 X B KWH METER 4.65wH 218.50volt 1.44ampere 0.99 310.31watt
15:20 22/5 /2016 U : 218.50 volt	
15:20 22/5 /2016 I : 1.44 Amp	
15:21 22/5 /2016 PF : 0.99	
15:21 22/5 /2016 P : 310.31 Watt	

tampilan web sederhana dapat dilihat pada Tabel 8.

Dari Tabel 8 terlihat bahwa akses data status KWH Meter melalui cara manual (melihat pada layar LCD) maupun otomatis (mengakses data melalui *ip address*) mempunyai hasil yang sama, sehingga alat ini berhasil menampilkan status KWH Meter sesuai dengan perintah.

J. Pengujian Kinerja Sistem

Saat catu daya dinyalakan maka pada LCD 16x2 akan tertampil waktu dan tanggal serta status dari KWH Meter dan sensor Wifi ESP 8266 siap untuk mengirim data saat *user* melakukan akses pada alamat ip (*ip address*) yang disediakan oleh sensor Wifi ESP 8266 dan langsung diunggah (*terupdate*) oleh sensor Wifi ESP 8266 saat *user* melakukan *monitoring*. Dengan *real time* status yang dapat dibaca pada LCD KWH Meter dan piranti yang digunakan untuk mengakses data monitoring, seperti ponsel maupun PC (*Personal Computer*) yang *terupdate* internet. *Monitoring* menggunakan LCD dilakukan dengan menekan *push button* “next” yang tersedia. *Push button* “next” menyebabkan layar LCD menggeser tampilan ke status selanjutnya. Tabel 9 menunjukkan pergeseran tampilan LCD saat *push button* ditekan.

Data *real time* pada pengaksesan status KWH Meter

Tabel 9. Pergeseran tampilan layar LCD dengan Push Button

Push Button	Tampilan	Tampilan pada LCD
penekanan pertama	Menampilkan Konsumsi Energi	15:18 22/5 /2016 W : 0.00 wH
penekanan kedua	Menampilkan Daya	15:18 22/5 /2016 P : 0.00 Watt
penekanan ketiga	Menampilkan Tegangan	15:18 22/5 /2016 U : 219.20 volt
penekanan keempat	Menampilkan Arus	15:18 22/5 /2016 I : 0.08 AMP
penekanan kelima	Menampilkan Cos Phi	15:18 22/5 /2016 PF : 0.00



Gambar 16. Tampilan LCD secara real time dengan waktu sebenarnya yang ter-update internet

dapat dilihat pada bagian atas layar LCD yang terdapat pada KWH Meter. Data *real time* sesuai dengan waktu yang *terupdate* dengan internet. Gambar 16 menunjukkan perbandingan *real time* KWH Meter dengan waktu *update* internet.

Pada Gambar 16 terlihat waktu yang tertampil pada LCD yaitu pukul 15:18 pada tanggal 22/5/2016 begitu juga waktu yang tertampil pada ponsel yang *terupdate* dengan internet yaitu pukul 15:18 tanggal 22/5/2016. Sehingga dapat dikatakan pengujian tampilan *real time* sesuai dengan fungsi yang diharapkan.

V. KESIMPULAN

Hasil pengujian menunjukkan semua komponen dapat berfungsi dengan baik. Sensor arus ACS712 30A memiliki rerata error 1%, sensor tegangan ZMPT101B mampu melakukan pembacaan tegangan dalam kondisi berbeban maupun tanpa beban dengan rerata kesalahan 0,5%, dan sensor beda fase mampu melakukan pembacaan beda fase dengan rerata error 1 % untuk beban resistif dan 4,2% untuk beban induktif berupa lampu TL. Pengukuran daya listrik untuk lampu pijar 75 W dan setrika 300 W mempunyai rerata error 1,3%. Hasil monitoring yang ditampilkan pada layar LCD pada KWH Meter mempunyai hasil yang sama dengan yang dipancarkan melalui modul WiFi ESP 8266, dan jarak modul WiFi ESP8266 dengan piranti pengakses maksimal 15 meter saat kondisi tidak terhalang dan 10 meter saat kondisi terhalang, dan data hasil pengukuran disimpan dalam Mikro SD Card.

REFERENSI

- [1] Jenis KWH Meter PLN (view Jan. 2019) [Online]. Available: <http://teknoenergi.blogspot.com/2013/07/jenis-kwh-meter-pln.html>
- [2] Kulkarni, Shailesh R., Chaphekar S.N., Energy Monitoring Using Wireless Technique, *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering* (SSRG-IJEEE) – volume 1 Issue8 Oct 2014 ISSN: 2348-8379 www.internationaljournalssrg.org Page 12. 2014.
- [3] Prabhu R., Geetha A., Vadivelan P., Ilayabharathy L., Smart Energy Meter with GSM Technology and Self Thermal Printing Technology *International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics* (IJETCSE) ISSN: 0976-1353 Volume 12 Issue 1 –DECEMBER 2014.
- [4] Afonso, Jose A., Rodrigues, Filipe., Pereira, Pedro., Goncalves, Henrique., Afonso, Joao L., 2015, Wireless Monitoring and Management of Energy Consumption and Power Quality Events, *Proceedings of the World Congress on Engineering* 2015, London, U.K Vol IWCE 2015, July 1 - 3, 2015.
- [5] Paul, Diya, Elizabeth., Vijayan, Alpha., Smart Energy Meter Using Android Application And GSM Network, *International Journal Of Engineering And Computer Science* (IJECS) ISSN:2319-7242 Volume – 5 Issue -03 March, 2016 Page No. 16058-16063
- [6] Jadhav, Akash N., Suryavanshi, Yogesh T., Dewar, Bosu K., Kumbhar, Mahesh M., Automatic Electric Meter Reading & Monitoring System Using GSM, *International Research Journal of Engineering and Technology* (IRJET) e-ISSN: 2395 -0056 Volume: 03 Issue: 05 | May-2016 www.irjet.net p-ISSN: 2395-0072 © 2016, IRJET | Impact Factor value: 4.45 | ISO 9001:2008 Certified Journal | Page 1025
- [7] Rachitha G., Kumar, Raushan., Srilakshmi S., Mishra, Koustubh., Umesh, Suma., GSM Based Energy Meter And Billing Via SMS, *International Journal of Latest Research in Engineering and Technology* (IJLRET) ISSN: 2454-5031 www.ijlret.com | PP. 209-212 NC3PS-2016
- [8] Dahlan, NY., Aris, AAM., Saidin, MA., Nadzeri, MJM., Nawi, MNM., Abas, WF., Abidin, AF., Mohammad, H., Zakaria, Z., Arshad, P., Development of Web-Based Real-time Energy Monitoring System for Campus University, *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, Vol. 8 No. 10 ISSN: 2180-1843 e-ISSN: 2289-8131, 2016.
- [9] Okafor, KC., Ononiwu, GC., Precious, U., Godis, AC., Development of Arduino Based IoT Metering System for On-Demand Energy Monitoring, *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology* (IJMEC) Vol. 7(23), Jan. 2017, pp. 3208-3224 IJMEC DOI: 649123/10.225112, 2017.
- [10] Mahmood, Noof T., Abbas, Eyad I., Wireless Controlling and Monitoring the Consumption Energy Meter based on ZigBee Technology, *International Journal of Current Engineering and Technology* Vol.7, No.5 (Sept/Oct 2017) E-ISSN 2277 – 4106, P-ISSN 2347-5161 ©2017 Available at <http://inpressco.com/category/ijcet> Research Article, 2017.
- [11] Muljono, Agung Budi., Nnatha, I Made Ari., Ginarsa, I Made., Suksmadana, I Made Budi., Rancang Bangun Smart Energy Meter Berbasis UNO dan Raspberry Pi, *Jurnal Rekayasa Elektrika* Vol. 14, No. 1, April 2018, hal. 9-18, ISSN. 1412-4785; e-ISSN. 2252-620X, ada di alamat <http://www.jurnal.unsyiah.ac.id/JRE/article/view/8718>

Modifikasi Fantom ORNL_MIRD untuk Kebutuhan Simulasi Monte Carlo Pasien Radioterapi Kanker Payudara Menggunakan MCNPX

Layna Miska, Rini Safitri, Irwandi, dan Elin Yusibani
Program Studi Magister Fisika, Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Syiah Kuala
Jln. Syeh Abdurrauf No.3, Kopelma Darussalam, Banda Aceh 23111
e-mail: rsafitri@unsyiah.ac.id

Abstrak—Dalam fisika medis, simulasi sebaran dosis radiasi dalam tubuh pasien radioterapi pada umumnya dilakukan menggunakan metode Monte Carlo. Namun dalam melakukan simulasi ini, para fisikawan medis seringkali dihadapkan pada masalah ketidaksesuaian geometri fantom dengan kebutuhan simulasi. Fantom ORNL-MIRD merupakan fantom yang paling sering digunakan dalam simulasi Monte Carlo. Dalam simulasi radioterapi, sel kanker biasanya hanya diasumsikan ada di dalam tubuh fantom tanpa adanya bentuk yang konkret. Hal ini dapat menyebabkan pemberian dosis radiasi yang tidak tepat pada sel kanker. Fantom ORNL-MIRD juga hanya tersusun dari tiga material, yaitu tulang, paru-paru, dan sisanya dianggap sebagai jaringan lunak. Hal ini tentu memberikan hasil simulasi yang kurang tepat terutama pada kasus radioterapi kanker payudara dimana payudara tersusun atas jaringan adiposa. Penelitian ini bertujuan membuat pemodelan fantom ORNL_MIRD yang sesuai untuk kebutuhan simulasi Monte Carlo pasien kanker payudara. Modifikasi fantom akan dilakukan pada struktur jaringan lunak bagian payudara dan struktur pada jaringan kulit. Sel kanker dengan diameter 2 cm juga ditambahkan dalam payudara sebelah kiri pada kedalaman 2,5 cm. Uji coba dilakukan dengan menembakkan sinar- γ dari radionuklida ^{60}Co dengan energi 1,1732 MeV dan 1,3325 MeV dan probabilitas masing-masing yaitu 0,989 dan 0,998. Hasil simulasi menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang besar sebelum dan sesudah modifikasi. Nilai laju dosis serap pada payudara dengan jaringan lunak tanpa sel tumor adalah 0,31 mGy/s dengan relative error 0,0023, sedangkan laju dosis serap pada payudara dengan jaringan lunak dan sel tumor adalah 0,2 mGy/s dengan relative error 0,0023.

Kata kunci: *fantom ORNL-MIRD, radioterapi, kanker payudara, monte carlo, MCNPX*

Abstract—In medical physics, the simulation of radiation dose distribution in the body of radiotherapy patients is generally carried out using the Monte Carlo method. But in conducting this simulation, medical physicists are often faced with the incompatibility problems of phantom geometry with simulation needs. Phantom ORNL-MIRD is the most commonly used phantom in simulation. In a radiotherapy simulation, cancer cells are usually only assumed to be in the phantom's body without any concrete form. This can cause the administration of radiation doses that are not right on cancer cells. Phantom ORNL-MIRD is also only composed of three materials, namely bone, lung, and the rest are considered as soft tissue. This certainly provides inappropriate simulation results, especially in the case of breast cancer radiotherapy where the breast is composed of adipose tissue. This study aims to make ORNL_MIRD phantom modeling suitable for the needs of Monte Carlo simulations of breast cancer patients. Phantom modification will be carried out on the soft tissue structure of the breast and the structure of the skin tissue. Cancer cells with a diameter of 2 cm were also added to the left breast at a depth of 2.5 cm. The γ rays from radionuclide ^{60}Co with energy of 1.1732 MeV and 1.3325 MeV and the probabilities of 0.989 and 0.998, respectively, was exposing to the phantom. The simulation results show that there are large differences before and after modification. Absorption dose values in the breast with soft tissue without tumor cells were 0.31 mGy with a relative error of 0.0023, while the absorbency dose rate in the breast with soft tissue and tumor cells was 0.2 mGy with a relative error of 0.0023.

Keywords: *phantom ORNL-MIRD, radiotherapy, breast cancer, monte carlo, MCNPX*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektroika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Salah satu pemanfaatan radiasi dalam bidang medis adalah terapi radiasi atau radioterapi. Radioterapi

merupakan salah satu jenis pengobatan dimana radiasi pengion dimanfaatkan sebagai sumbernya. Radioterapi biasanya digunakan sebagai pilihan pengobatan penyakit kanker. Adapun jenis kanker yang seringkali dianjurkan

untuk mendapat perlakuan radioterapi adalah kanker payudara. Kanker payudara diketahui sebagai jenis kanker yang paling sering muncul pada wanita dan menyebabkan nilai kematian bagi wanita tertinggi yaitu 522.000 kematian pada tahun 2012. Kanker payudara juga merupakan salah satu jenis kanker yang paling sering didiagnosis di dunia dengan 1,7 juta kasus atau sekitar 11,9% dari keseluruhan diagnosis kanker. Angka ini menduduki peringkat kedua setelah kanker paru-paru dengan 1,8 juta kasus atau sekitar 13% dari total diagnosis kanker [1].

Radiasi yang digunakan dalam radioterapi adalah radiasi dosis tinggi dengan tingkat energi berada dalam rentang 10 keV sampai 35 MeV. Oleh karena itu, sebelum pasien diberi perlakuan radioterapi, penting bagi fisikawan medis untuk melakukan simulasi komputer guna mengetahui pemberian dosis radiasi yang tepat [2]. Metode yang umum digunakan untuk melakukan simulasi radioterapi adalah metode Monte Carlo [3].

Dalam melakukan simulasi radioterapi pada pasien, masalah yang seringkali dihadapi adalah besarnya perbedaan antara fantom tubuh dengan kondisi tubuh manusia yang sebenarnya. Fantom model tubuh manusia yang digunakan dalam *Treatment planning* merupakan pengganti tubuh pasien yang sebenarnya. Fantom ini dapat dibuat secara manual maupun melalui simulasi komputer [4]. Namun perbedaan struktur fantom dengan tubuh manusia yang sebenarnya menyebabkan sebaran dosis hasil simulasi akan berbeda dengan kondisi sebenarnya. Kondisi ini menyebabkan sulitnya memperkirakan dosis radiasi yang tepat untuk membunuh sel kanker serta efek samping yang dapat terjadi pada tubuh pasien pasca radioterapi [5].

Pada kasus simulasi Monte Carlo untuk kasus radioterapi, para fisikawan medis menggunakan fantom dengan berbagai bentuk dan pendekatan tergantung kemampuan dari *software* yang digunakan. Sebagai contoh, fantom kepala dianggap berbentuk bola, atau fantom tubuh dan payudara yang dianggap berbentuk kotak.

Salah satu *software* yang memungkinkan penggunaannya menyusun geometri fantom dengan lebih leluasa adalah Monte Carlo N-Particle eXtended (MCNPX). MCNPX merupakan sebuah *software* berbasis Monte Carlo yang digunakan untuk mensimulasikan jejak partikel radiasi dalam material. MCNPX dapat mensimulasikan transport radiasi *step by step* sehingga mendekati kondisi sebenarnya. *Software* ini juga menyediakan database berbagai bentuk geometri yang dapat digunakan untuk menyusun fantom tubuh manusia dengan lebih sempurna [6].

Dalam MCNPX, fantom yang seringkali digunakan adalah fantom ORNL. Fantom ini telah digunakan secara luas dalam mensimulasikan transport radiasi dalam materi terutama menggunakan metode Monte Carlo. Fantom ORNL-MIRD dipublikasikan oleh Krstic dan Nikezic pada tahun 2007 [7]-[9].

Tubuh manusia merupakan sebuah struktur yang sangat rumit yang terdiri dari berbagai jaringan dan organ dengan bentuk serta atom penyusun yang sangat

<i>J</i>	<i>m</i>	<i>d</i>	<i>Geom</i>	<i>params</i>
----------	----------	----------	-------------	---------------

Gambar 1. Format *cell card*

kompleks. Ukuran organ penyusun juga berbeda untuk setiap orang. Oleh karena itu, dalam penyusunan fantom dilakukan berbagai pendekatan agar semirip mungkin dengan kondisi tubuh sebenarnya baik dari segi bentuk, ukuran, maupun material penyusunnya.

Material penyusun fantom ORNL-MIRD hanya menggunakan tiga jenis material, yaitu tulang, paru-paru dan selebihnya dianggap sebagai jaringan lunak. Struktur material ini tentunya berbeda dengan struktur atom penyusun tubuh manusia sebenarnya. Terlebih pada kasus simulasi radioterapi kanker payudara. Payudara tersusun dari jaringan lemak atau jaringan adiposa yang memiliki daya serap yang berbeda terhadap radiasi yang diberikan dibandingkan dengan jaringan lunak.

Dalam melakukan simulasi, sel tumor atau kanker sering kali hanya diasumsikan ada di dalam payudara tanpa adanya geometri yang konkret dari sel tumor tersebut. Untuk itu, perlu dibuat sebuah rancangan penambahan sel tumor pada kasus simulasi radioterapi kanker payudara serta mengganti jaringan lunak dengan jaringan adiposa agar hasil simulasi lebih mendekati keadaan sebenarnya.

Penelitian ini bertujuan menyusun fantom model ORNL-MIRD yang sesuai dengan kebutuhan simulasi radioterapi kanker payudara. Fantom tubuh pasien kanker payudara disusun dengan menambahkan beberapa material penyusun fantom. Penambahan material ini guna mendapatkan fantom yang lebih mendekati kondisi tubuh manusia sebenarnya.

Dalam MCNPX, definisi fantom disusun dalam *cell card*, *surface card* serta *material card*. Adapun *Cell card* digunakan untuk mendefinisikan jumlah sel serta bentuk dan material penyusun dari masing-masing sel. Dalam *cell card* juga dapat didefinisikan densitas dari setiap sel yang akan disusun. Adapun format untuk *cell card* dapat dilihat pada Gambar 1.

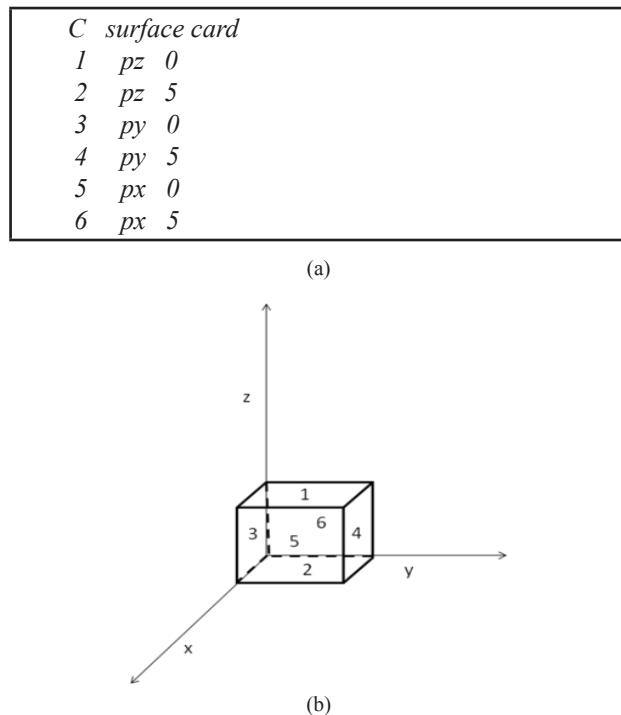
Dimana *J* menunjukkan jumlah sel yang ingin disusun, penomoran material ditunjukkan dalam kolom *m*, *d* merupakan densitas dari masing-masing sel dalam satuan g/cm³, sedangkan *Geom* merupakan nomor permukaan atau batasan dari tiap-tiap sel dan *params* merupakan input tambahan seperti tingkat kepentingan sel.

Adapun *surface card* digunakan untuk menginisiasi geometri dari masing-masing sel. Dalam *surface card* ditentukan koordinat dari masing-masing sel yang disusun sehingga tidak tumpang tindih antara satu dan lainnya. Adapun format dari *surface card* tampak pada Gambar 2.

Geometri pada *surface card* menunjukkan batasan permukaan dari setiap sel yang disusun. *J* menunjukkan penomoran dari setiap pembukaan sel, sedangkan *Geom* adalah koordinat dari setiap sel. *Geom* disusun berdasarkan

<i>J</i>	<i>Geom</i>
----------	-------------

Gambar 2. Format *surface card*

Gambar 3. (a) contoh input *surface card*; (b) output

jenis bangun yang diinginkan sebagai pemodelan tiap sel yang dalam kasus radioterapi mewakili bagian tubuh manusia atau fantom. Gambar 3 merupakan contoh input *surface card* untuk membentuk sebuah persegi dengan panjang rusuk 5 cm.

Adapun *material card* digunakan untuk mendefinisikan material yang menyusun setiap sel. Input material berisi struktur atom dari material penyusun setiap sel. Adapun format *material card* material dapat dilihat pada Gambar 4.

Dimana *Mn* menunjukkan penomoran material, *zaid* adalah nomor atom yang diikuti nomor massa dari isotop. Sedangkan *fraction* merupakan fraksi nuklida di dalam material yang ditunjukkan dengan + untuk kepadatan atom dan – untuk berat [4].

II. METODE

Penelitian ini dilakukan menggunakan sebuah software berbasis Monte Carlo yaitu MCNPX. Adapun langkah-langkah yang dilakukan adalah menyusun kode program dengan *input* pada setiap kartu. Dimulai dengan menentukan jumlah serta densitas setiap *cell* yang disusun membentuk organ tubuh manusia, menentukan batas-batas permukaan *cell*, selanjutnya menentukan material berupa struktur atom penyusun serta fraksi setiap atom.

Fantom dalam penelitian ini disusun menggunakan model ORNL-MIRD yang telah dimodifikasi dengan mengganti struktur material penyusun payudara dari jaringan lunak menjadi jaringan adiposa serta

<i>Mn</i>	<i>zaid1</i>	<i>fraction1</i>	<i>zaid2</i>	<i>fraction2</i>
-----------	--------------	------------------	--------------	------------------

Gambar 4. Format *material card*

Tabel 1. Komposisi jaringan kulit dan payudara [10]

Atom	Fraksi	
	Kulit	Adiposa
H	0,10058	0,11947
C	0,22825	0,63724
N	0,04642	0,00797
O	0,61900	0,23233
Na	0,00007	0,00050
Mg	0,00006	0,00002
P	0,00133	-
S	0,00199	0,00016
Cl	0,00134	0,00119
K	0,00199	-
Ca	0,00023	-
Fe	0,00001	-
Zn	0,00001	-

menambahkan jaringan kulit.

Adapun payudara dibuat berbentuk setengah bola dengan diameter 15 cm. Densitas payudara diasumsikan sama dengan densitas jaringan adiposa atau jaringan lemak yaitu 0,92 g/cm³ dengan volume 337 cc.

Struktur atom penyusun jaringan kulit juga dimasukkan. Kulit merupakan materi pertama yang akan menyerap radiasi yang diberikan atau disebut juga dosis permukaan. Besarnya dosis permukaan tergantung dari struktur material permukaan tubuh. Dosis ini akan mempengaruhi nilai dosis yang tersebar di dalam tubuh pasien. Mengasumsikan jaringan kulit sama dengan jaringan lunak akan memberikan nilai dosis yang berbeda.

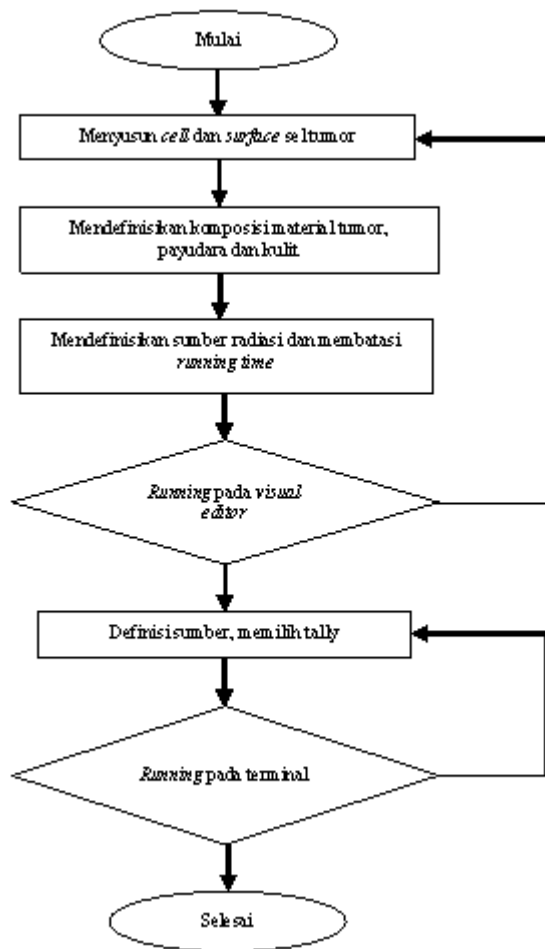
Sel tumor berbentuk bola dengan diameter 2 cm dimasukkan pada payudara sebelah kiri pada kedalaman 2,5 cm dengan struktur jaringan sama dengan jaringan lunak. Ukuran serta letak sel tumor dalam tubuh fantom kemudian dapat diatur sesuai dengan kebutuhan simulasi.

Adapun struktur atom dari material penyusun kulit dan payudara ditabulasikan pada Tabel 1.

Setelah modul fantom disusun, kode program di-*running* pada MCNP *visual editor* untuk mendapatkan gambar fantom.

Untuk mengetahui perbedaan hasil simulasi radioterapi antara fantom ORNL_MIRD dengan hasil modifikasi, dilakukan uji coba dengan menembakkan sinar- γ dari radionuklida ⁶⁰Co dengan energi 1,1732 MeV dan 1,3325 MeV yang memiliki probabilitas masing-masing sebesar 0,989 dan 0,998. Metode penyinaran yang digunakan adalah penyinaran langsung, dengan demikian sumber diletakkan pada jarak 80 cm dari permukaan tubuh fantom sejajar payudara kiri [11] (Tabel 2).

Selanjutnya dibatasi *running time* dengan menginput jumlah partikel yang disimulasi pada NPS *card* yaitu 100.000 partikel. Perhitungan dipilih menggunakan *tally F6* yang akan memberikan output dalam satuan MeV/g. Dalam dosimetri radiasi, dosis serap biasanya dihitung dalam besaran Gy atau Joule/kg sehingga pada



Gambar 5. Diagram alir modul

tally F6 diberikan faktor pengali $1,6E-10$. MCNPX memberikan output berupa deposisi energi dari satu buah partikel, sehingga untuk menghitung nilai deposisi energi sebenarnya masih harus dikalikan dengan banyaknya partikel yang keluar dari sumber yaitu sebesar $7E+9$ Bq [12]. Secara umum, langkah penyusunan modul serta uji simulasi ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar 5.

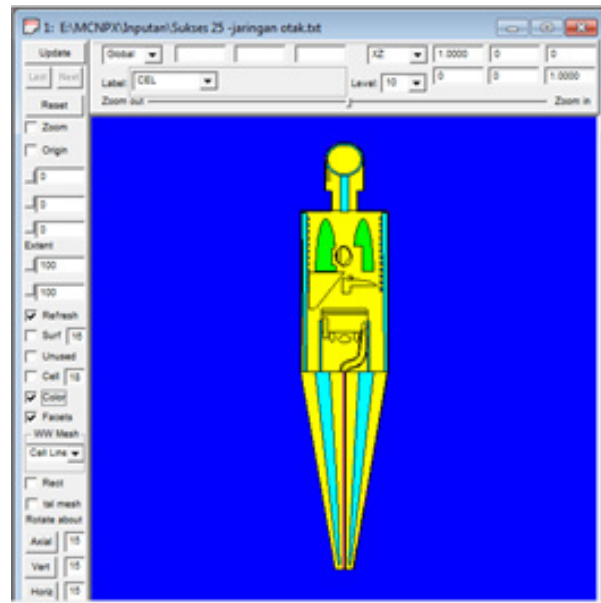
Pendefinisian sumber dilakukan menggunakan perintah SDEF dengan data input sumber ditunjukkan pada Tabel 2.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Model fantom ORNL_MIRD ini dibuat semirip mungkin dengan tubuh manusia yang memuat hampir

Tabel 2. Data definisi sumber [13]

Sumber	Co60
Nomor atom	27
Nomor massa	60
Energi	1,1732 MeV dan 1,3325 MeV
Jenis partikel	Foton
Jarak sumber	80 cm
Koordinat	(8.63 -111.9552 46.87)

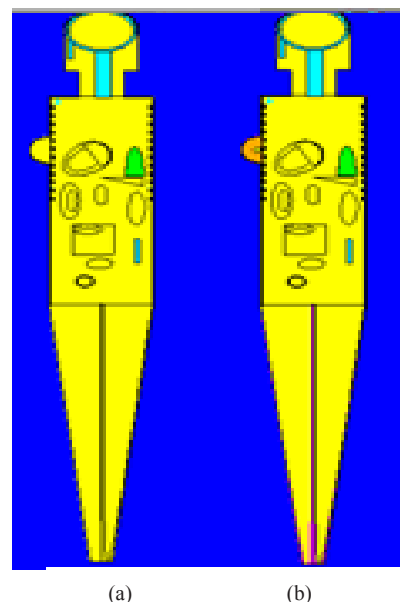


Gambar 6. Hasil running kode program pada MCNP visual editor pada sumbu XZ

semua organ penting. Organ dalam tubuh fantom dibuat dengan berbagai pendekatan baik dari segi bentuk maupun struktur atom penyusun organ. Gambar 6 menunjukkan fantom tubuh wanita hasil simulasi yang di-running pada visual editor pada sumbu XZ.

Jika dilihat dari sumbu XZ, maka tidak terlihat perbedaan yang kentara antara fantom ORNL-MIRD original dengan hasil modifikasi. Namun perbedaan mendasar dapat dilihat dari sumbu YZ sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.

Perbedaan warna pada fantom menunjukkan perbedaan



Gambar 7. Hasil running kode program pada MCNP visual editor: (a) Fantom ORNL-MIRD Original, (b) Fantom hasil modifikasi. Perbedaan yang paling utama terdapat pada bagian payudara, dimana pada payudara ini tersusun dari struktur material yang berbeda (berwarna orange) serta kulit berwarna merah muda. Di dalam payudara juga terdapat tumor berdiameter 2 cm dengan kedalaman sekitar 2,5 cm.

densitas organ. Dari kedua gambar tersebut dapat dilihat perbedaan antara fantom ORNL_MIRD original dengan hasil modifikasi. Pada fantom ORNL-MIRD original, seluruh tubuh fantom selain tulang (berwarna biru dengan densitas $1,4 \text{ g/cm}^3$) dan paru-paru (berwarna hijau dengan densitas $0,296 \text{ g/cm}^3$), tersusun dari jaringan lunak (berwarna kuning dengan densitas $1,04 \text{ g/cm}^3$) termasuk payudara. Sedangkan pada fantom hasil modifikasi, payudara tersusun dari struktur material yang berbeda (berwarna orange dengan densitas $0,92 \text{ g/cm}^3$) serta kulit berwarna merah muda dengan densitas $1,1 \text{ g/cm}^3$. Struktur atom penyusun jaringan kulit dan payudara didefinisikan sesuai yang ditunjukkan dalam Tabel.1.

Di dalam payudara kiri terdapat tumor dengan diameter 2 cm kiri pasien pada kedalaman sekitar 2,5 cm dengan koordinat (8.63 -9.5 46.87) ditunjukkan oleh *cell* dengan nomor 68. Adapun densitas serta atom penyusun sel tumor dianggap sama dengan jaringan lunak.

Untuk mempermudah meninjau organ dalam simulasi, semua sel diberikan penomoran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Payudara kiri sebagai organ utama yang ditinjau ditunjukkan oleh nomor 65, sedangkan sel tumor ditunjukkan oleh nomor 68.

Untuk mengetahui secara detail perbedaan fantom hasil modifikasi ini dengan fantom ORNL-MIRD original, dilakukan simulasi penyinaran sinar- γ pada kedua fantom tersebut dengan sumber diletakkan pada jarak 80 cm di depan payudara kiri.

Hasil simulasi menunjukkan perbedaan nilai laju dosis serap yang besar pada payudara kedua fantom. Pada fantom ORNL-MIRD original, nilai laju dosis serap pada payudara adalah $0,31 \text{ mGy/s}$ dengan nilai *relative error* 0,0023. Sedangkan pada fantom hasil modifikasi, laju dosis serap pada payudara adalah $0,2 \text{ mGy/s}$ dengan *relative error* 0,0023 dan laju dosis serap pada sel tumor

sebesar 9 mGy dengan *relative error* 0,0027. Terdapat deviasi perbedaan laju dosis serap pada payudara sebesar 36% terhadap nilai sebelum modifikasi, nilai perbedaan yang cukup besar ini selain disebabkan oleh perbedaan struktur jaringan lunak yang telah dipilih juga dikarenakan pada fantom hasil modifikasi, perhitungan dosis serap pada sel tumor dan payudara dilakukan secara terpisah. Tumor mendapatkan dosis serap sangat tinggi karena adanya faktor *build up* dimana dosis maksimum atau $D_{\max}$ tidak berada di permukaan tubuh melainkan pada kedalaman beberapa cm. Nilai dosis ini menunjukkan bahwa nilai dosis maksimum terdapat pada sel tumor. Adanya perhitungan pada tumor ini memudahkan pemberian dosis yang tepat pada sel target.

Namun jika dikalkulasikan, dengan massa payudara 360 g dan massa tumor 3 g, maka total deposisi energi radiasi pada payudara fantom original adalah 111,6 Joule sedangkan pada payudara fantom modifikasi adalah 108 Joule. Perbedaan ini menunjukkan bahwa mengasumsikan kulit dan payudara sebagai jaringan lunak akan memberikan hasil simulasi yang berbeda.

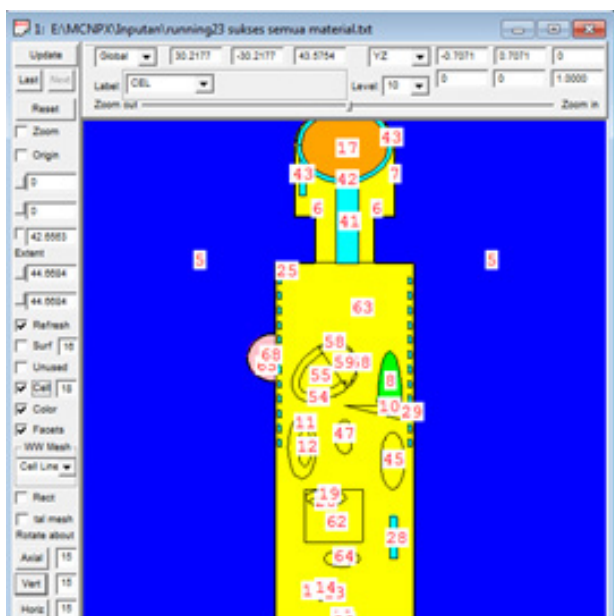
Variasi pada fantom seperti ukuran dan letak tumor dalam payudara kemudian dapat dilakukan sesuai kebutuhan *treatment* sehingga dapat memberikan hasil yang tepat sesuai kebutuhan.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan sebuah fantom tubuh yang dapat digunakan untuk melakukan simulasi Monte Carlo paparan radiasi bagi pasien kanker payudara. Tumor dengan diameter 2 cm telah diletakkan pada payudara kiri fantom pada kedalaman 2,5 cm serta penambahan jaringan penyusun kulit dan payudara. Simulasi radioterapi uji coba dilakukan dengan menembakkan sinar- γ dari radionuklida ^{60}Co . Hasil simulasi menunjukkan perbedaan-perbedaan nilai sebaran dosis yang kentara dengan nilai *relative error* yang sangat kecil. Ukuran serta posisi tumor dalam fantom ini kemudian juga dapat disesuaikan dengan kebutuhan simulasi.

REFERENSI

- [1] Anonymus, International Agency For Research On Cancer, "Latest World Cancer Statistics Global Cancer Burden Rises To 14.1 Million New Cases In 2012 : Marked Increase In Breast Cancers Must Be Addressed", Press Release 223, 2013.
- [2] D. Barsasella, *Fisika untuk mahasiswa kesehatan*, Jakarta, Indonesia: Trans Info Media, 2010.
- [3] A. Rizani, W. S. Budi, dan C. Anam, "Simulasi Monte Carlo untuk Menentukan Dosis Sinar-X 6 MV pada Ketidakhomogenan Medium Jaringan Tubuh", *Berkala Fisika*, vol. 15, No.2, pp. 49-56, 2012.
- [4] A. D. Lazarine, "Medical Physics Calculation with MCNP™: A Primer", *A Thesis*, Texas A&M University, Texas, 2006.
- [5] R. Kurniawan, V. Gunawan, dan C. Anam, "Koreksi Kurva Isodosis 2D untuk Jaringan Non Homogen Menggunakan Metode TAR (Tissue air Ratio)", *Youngster Physics journal*, vol 3, pp. 227-234, 2014.



Gambar 8. Hasil running kode program disertai pemberian nomor untuk setiap sel. Payudara kiri sebagai organ utama yang ditinjau ditunjukkan oleh nomor 65, sedangkan sel tumor ditunjukkan oleh nomor 68

- [6] J. K. Shultis, and R. E. Faw, *An MCNP Primer*, Manhattan: Kansas State University, 2011.
- [7] D. Krstic, and D. Nikezic, "Conversion coefficients for Age Dependent ORNL Phantoms from ^{137}Cs in Soil as a Source of External Exposure", *Nuclear Instruments and Methods A*, Vol. 580, No. 1, pp. 540-543, 2007.
- [8] D. Krstic, and D. Nikezic, "External Doses in Humans from ^{137}Cs in Soil", *Health Physics*, Vol. 91, No. 3, pp. 249-257, 2006.
- [9] D. Krstic, and D. Nikezic, "Input Files with ORNL-Mathematical Phantoms of The Human Body for MCNP-4B", *Computer Physics communications*, Vol. 176, No. 1, pp. 33-37, 2007.
- [10] H. O. Tekin, V. P. Singh, E. E. Altunsoy, T. Manici, and M. I. Sayyed, "Mass Attenuation Coefficient of Human Body Organs Using MCNPX Monte Carlo Code", *Iranian Journal of Medical Physics*, Vol. 14, pp. 229-240,
- [11] M. Mathuthu, N. W. Mdziniso, and Y. H. Asres, "Dosimetric Evaluation of Cobalt-60 Teletherapy in Advanced Radiation Oncology", *Journal of Radiotherapy in Practice*, Vol. 18, No. 1, pp. 88-92, 2018.
- [12] R. A. Redd, "Radiotherapy Dosimetry Physics Calculation Using MCNP5", *A Thesis*, Texas A&M University, Texas, 2003
- [13] M. Aziz, E. Hidayanto, dan D. D. Lestari, "Penentuan Aktivitas ^{60}Co Dan ^{137}Cs pada Sampel *Unknown* Dengan Menggunakan Detektor Hpge" *Youngster Physics Journal*, Vol. 14, No.2, pp. 189 -196, 2015.

Desain Sistem Pemantauan Pengukuran Potensi Tenaga Matahari dan Tenaga Angin

Aries Jehan Tamamy¹, Zaenal Arifin¹, dan Amalia²

¹Jurusan Teknik Elektro, Universitas Dian Nuswantoro

²Jurusan Teknik industri, Universitas Dian Nuswantoro

Jl. Imam Bonjol No.207, Pendrikan Kidul, Semarang Tengah, Kota Semarang, Jawa Tengah 50131

e-mail: jehantammy@dsn.dinus.ac.id

Abstrak—Penerapan energi baru terbarukan dapat menjadi alternatif dalam penyediaan energi listrik pada daerah yang belum terjangkau jaringan listrik maupun di daerah perkotaan untuk dapat mengurangi konsumsi listrik pada pemakaian rumah tangga. Salah satu kendala dalam penerapannya adalah bagaimana mengukur potensi energi matahari dan energi angin untuk menentukan kelayakan pemasangan sistem pada suatu daerah. Penelitian ini menggunakan Arduino Uno sebagai controller utama yang dihubungkan dengan sensor tegangan, sensor arus ACS712 30A dan sensor intensitas cahaya BH1750 untuk mengukur potensi tenaga sinar matahari serta sensor kecepatan angin untuk mengukur potensi tenaga angin. Perancangan *software* dilaksanakan dengan menggunakan program Arduino IDE yang berhasil membuat sistem yang stabil dengan biaya yang terjangkau yang mampu beroperasi pada semua jenis panel surya dengan maximum tegangan 34,7 V dan arus ± 30 A. Dari hasil pengujian sistem, dihasilkan sebuah sistem dengan tingkat akurasi pembacaan sensor tegangan sebesar 99,2% dan sensor arus sebesar 95,3% dan sensor cahaya sebesar 99,8% serta tingkat presisi yang baik dengan nilai SDR untuk setiap sensornya sebesar 0,034%, 4,58%, dan 0,026%.

Kata kunci: *sistem pemantauan, data logger, tenaga angin, tenaga matahari*

Abstract—Renewable energy implementation could become the alternative for electrical energy supply in remote area with no network for electricity and also could be implemented in urban area to reduce the electricity consumption in daily usage. One of the problems to implement renewable energy is how to measure solar power potentiation and wind power potentiation to decide the qualification to apply the system in certain area. This research used Arduino Uno as main Controller that connected to Voltage sensor, Current Sensor ACS712 30A dan light intensity sensor BH1750 to measure solar power potentiation and also anemometer to measure wind power potentiation. Software design was done using Arduino IDE program that successfully produced stable Low-Cost system that can operate well with all kind of solar panel with maximum Voltage of 34.7 V and current ± 30 A. The results from system testing shows that the system has accuracy for voltage sensor with value of 99.2%, current sensor with value of 95.3% and light intensity sensor with value of 99.8% and also has good precision with SDR value for every sensors are 0.034%, 4.58% and 0.026%.

Keywords: *monitoring system, data logger, wind power, solar power*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektroika. All right reserved

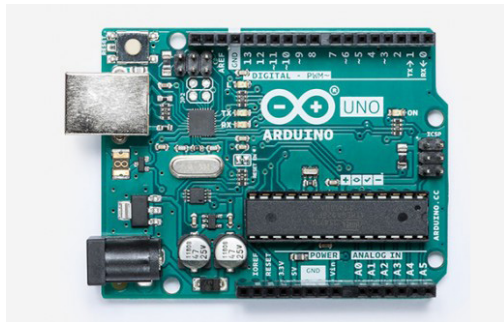
I. PENDAHULUAN

Indonesia mempunyai potensi pemanfaatan energi terbarukan yang sangat besar, terutama energi matahari dan energi angin yang terdapat hampir di seluruh bagian Indonesia. Pemanfaatan energi tersebut telah menjadi alternatif dalam penyediaan energi listrik pada daerah yang belum terjangkau jaringan listrik PLN. Selain itu pemanfaatan energi terbarukan juga dapat digunakan di daerah kota untuk mengurangi konsumsi listrik pada pemakaian rumah tangga dengan memanfaatkan energi angin menggunakan kincir angin dan memanfaatkan energi matahari menggunakan panel surya [1].

Beberapa faktor yang harus dipersiapkan untuk penerapan energi baru terbarukan di Indonesia adalah data

potensi Energi Baru Terbarukan (EBT), Teknologi, dan Sumber Daya Manusia (SDM) [2]. Salah satu kendala dari faktor-faktor dalam pemanfaatan energi alternatif tersebut adalah bagaimana menentukan potensi energi pada suatu daerah dengan memanfaatkan teknologi. Dikarenakan biaya investasi instalasi PV tidaklah kecil, penerapan sistem tenaga baru terbarukan belum bisa terlaksana di kalangan masyarakat umum.

Oleh karena hal tersebut, sebelum melakukan instalasi PV, diperlukan data potensi energi pada daerah tersebut sehingga instalasi generator kincir angin ataupun PV *system* dapat bekerja dengan efektif. Dengan demikian perlu dikembangkan sebuah sistem pemantauan dan pengukuran potensi energi matahari dan energi angin yang mudah digunakan, terukur dengan baik dan dapat



Gambar 1. Arduino Uno development Board

membantu menentukan kesiapan suatu daerah terhadap energi baru terbarukan.

II. METODE PELAKSANAAN

A. Waktu Objek Penelitian

Waktu pembuatan dan pengujian alat dilaksanakan selama 3 (tiga) bulan. Penelitian dilakukan dengan merancang sebuah sistem pemantauan potensi energi potensi matahari dan potensi energi angin dengan melakukan perancangan di laboratorium Instrumentasi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Dian Nuswantoro Semarang, sedangkan pengujian sistem dilaksanakan di daerah Perumahan Nasional Krpyak, kota Semarang, Jawa Tengah.

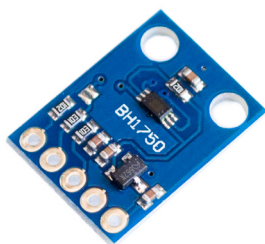
B. Alat dan Bahan Penelitian

Beberapa alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

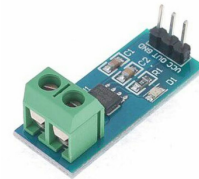
1. *Microprocessor* Arduino Uno sebagai prosesor utama pada sistem yang digunakan untuk menerima dan mengolah data. Pemakaian Arduino uno R3 seperti Gambar 1 sebagai pengendali hanya digunakan untuk mempermudah penelitian. Untuk pengembangan berikutnya *microprocessor* yang digunakan dapat disesuaikan berdasarkan kebutuhan sistem.

2. Sensor Intensitas Cahaya BH1750 digunakan sebagai sensor pembaca intensitas cahaya matahari dengan satuan Lux (lx) yang mempunyai jangkauan pengukuran dari 0–65535 [3]. Sensor ini merupakan sebuah modul sistem minimum dari IC BH1750 yang mempunyai 5 buah pin untuk suplai dan komunikasi seperti pada Gambar 2.

3. Sensor Arus ACS1750 30A pada Gambar 3 digunakan untuk mengukur arus DC dari PV sistem.



Gambar 2. Sensor Intensitas Cahaya BH1750



Gambar 3. Sensor arus ACS712



Gambar 4. Sensor kecepatan angin

Sensor ini digunakan dengan memperhitungkan nilai arus yang akan diukur diperkirakan kurang dari sama dengan 30A.

4. Sensor Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan angin dalam satuan m/s. Gambar 4 merupakan anemometer mangkok yang digunakan pada penelitian dengan menggunakan 3 bilah mangkok pada baling-balingnya.

5. Sensor tegangan untuk mengukur teggangan dari PV sistem dengan menggunakan prinsip pembagi tegangan dengan menggunakan dua buah resistor yang disusun secara seri dengan perbandingan kedua resistor dihitung sesuai dengan kebutuhan sistem.

6. *Data Logger Shield* dengan RTC digunakan untuk melakukan pencatatan data berdasarkan waktu dan tanggal pengambilan data. *Data Logger shield* untuk Arduino dapat melakukan pencatatan data secara otomatis, merupakan program *Open Source* dan dapat diaplikasikan dengan biaya yang relatif murah. Selain itu juga dapat disesuaikan untuk penggunaan yang spesifik untuk project dengan biaya rendah [4].

7. *PV system* sebagai objek pengukuran yang mampu mengubah tenaga matahari menjadi tenaga listrik. *PV system* yang dipakai dalam penelitian ini adalah panel surya Shinyoku yang mempunyai spesifikasi seperti tertera pada Tabel 1.

Output solar panel tersebut terhubung dengan MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) dengan kapasistas 30Ampere.

Gambar 5 menunjukkan MPPT yang dipakai dalam penelitian ini yang merupakan MPPT dengan PWM

Tabel 1. Spesifikasi Panel Surya Shinyoku 50WP

Maximum Power (Pmax)	50 W
Maximum Power Voltage (Vmp)	17,5 V
Maximum Power Current (Imp)	2,86 A
Open Circuit Voltage (Voc)	20,9 V
Short Circuit Current (Isc)	3,18 A



Gambar 5. MPPT 30 Ampere dengan output PWM

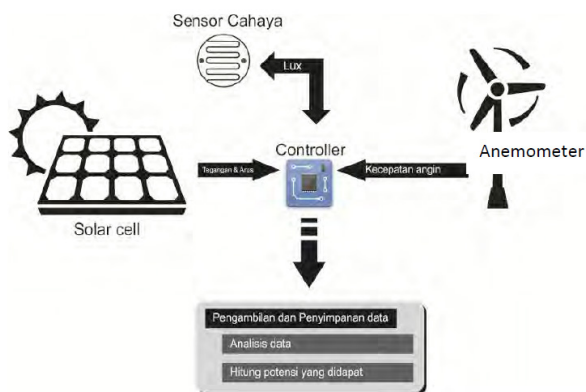
(Power Width Modulation) controller yang memungkinkan untuk mengoptimalkan pengisian baterai [5], [6].

C. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut.

1. Studi literatur. Pada tahapan pertama penelitian ini, metode analisis perancangan dan pengujian sistem ditentukan berdasarkan referensi yang dapat mendukung penelitian. Tahapan ini juga dilakukan untuk menentukan obyek penelitian dan penentuan lokasi pengujian sistem yang telah dirancang akan dilaksanakan.
2. Perancangan sistem pemantauan dan pengukuran potensi tenaga matahari dan tenaga angin. Desain sistem ini terdiri dari 2 bagian, yaitu desain hardware dan desain software. Desain hardware pada penelitian ini dilakukan dengan melakukan pengkabelan untuk menghubungkan PV system, sensor-sensor, microprocessor, LCD dan Power supply seperti pada Gambar 6. Sumber tenaga yang digunakan oleh sistem dapat dihubungkan dengan salah satu dari dua sumber tenaga. Yang pertama dengan menghubungkan dengan baterai 6V–12V ke sistem atau dapat dihubungkan langsung dengan baterai 12V 17AH yang merupakan baterai yang diisi oleh solar panel sehingga sistem tidak memerlukan tambahan sumber daya lagi.

Desain software dilakukan menggunakan program *Arduino IDE (Integrated Development Environment)*.



Gambar 6. Perancangan sistem pemantauan pengukuran potensi energi matahari dan angin

Desain *software* pada sistem lebih diutamakan pada pengambilan data, pemrosesan data menjadi *dataset* dan proses penulisan data ke *SD card* atau *data logger* [7].

3. Proses Pengujian. Proses ini dibagi menjadi 3 tahap pengujian, yaitu uji stabilitas untuk mengetahui apakah sistem dapat berjalan dengan baik, uji Akurasi sistem yang dilakukan untuk mengetahui apakah data yang diukur sesuai dengan data aslinya atau tidak, dan uji presisi data hasil pengukuran dilakukan untuk mengetahui seberapa jauh simpangan yang dihasilkan dari hasil pengukuran dengan menggunakan rumus simpangan baku relatif (RSD) dan simpangan baku (SD) seperti pada (1) dan (2).

$$RSD(\%) = \frac{SD}{\bar{x}} 100\% \quad (1)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

4. Analisis dan Penarikan kesimpulan: dari data yang diperoleh pada tahap pengujian akan dianalisis dan diambil kesimpulan untuk menentukan hasil dari penelitian yang telah dilaksanakan.

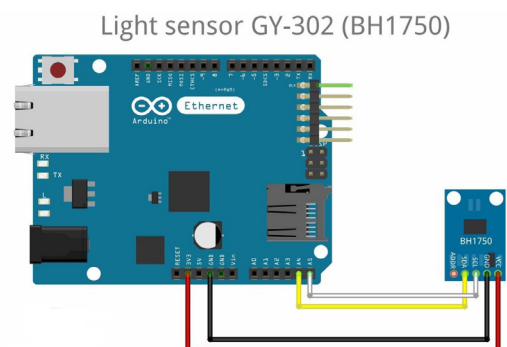
III. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Perancangan Hardware

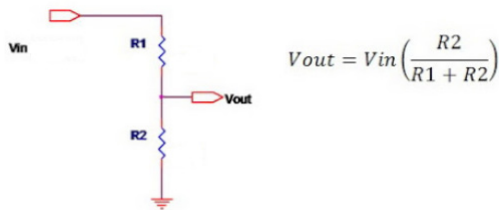
Perancangan sistem pemantauan ini dilakukan dengan menghubungkan sensor cahaya, sensor kecepatan angin, sensor tegangan, sensor arus, data logger, dan peripheral lainnya dengan *microcontroller* Arduino Uno sesuai desain pada Gambar 6 dengan spesifikasi pengkabelan dan pemetaan pin seperti berikut.

1. Sensor cahaya

Sensor cahaya yang dipakai adalah BH1750 yang dihubungkan menggunakan protokol komunikasi I2C dengan alamat 0x23 dan disambungkan dengan pin SDA pada pin A4 dan SCL pada pin A5 Arduino seperti pada Gambar 7. Data yang dikirimkan oleh sensor cahaya kemudian disimpan dalam format integer. Komunikasi I2C juga dilakukan secara paralel terhadap LCD yang digunakan untuk menampilkan data pada sistem. Data



Gambar 7. Pengkabelan sensor cahaya BH1750



Gambar 8. Rancangan sensor tegangan dengan sistem pembagi tegangan

yang diambil disesuaikan dengan standar pencahayaan dalam dan luar ruangan [8].

2. Sensor Tegangan

Sensor tegangan yang dipakai dalam penelitian ini menggunakan prinsip pembagi tegangan sehingga mampu membaca data tegangan di atas batas maximum ADC pada Arduino Uno.

Pada Gambar 8, Pin Vout pada Sensor tegangan dihubungkan dengan pin analog A2 untuk membaca tegangan dengan ADC internal Arduino yang beresolusi 0–1024 untuk tegangan 0–5V. hasil dari pengukuran sensor tegangan tersebut kemudian dikalikan dengan ratio perbandingan R1 dan R2 untuk mendapatkan nilai Vin yang sesungguhnya. Untuk ratio R1 dan R2 yang dipakai dalam penelitian ini adalah sebesar 6,94:1. Dengan maximum pengukuran tegangan sebesar 34,7V.

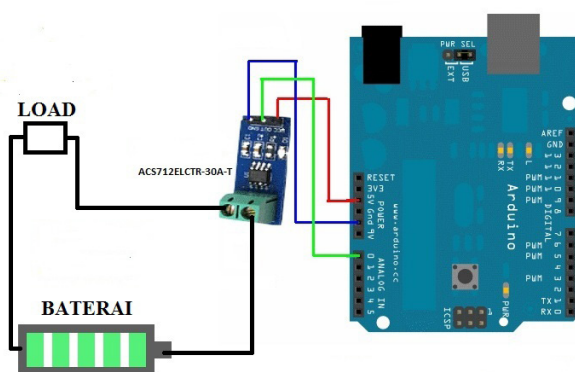
3. Sensor Arus

Sensor arus yang digunakan dalam penelitian ini merupakan sensor arus DC dengan tipe ACS712-30A-T dalam bentuk chipset yang mampu mengukur arus DC hingga 30A [9]. data sensor tersebut berupa data analog yang dihubungkan dengan Arduino Uno pada Pin A0 dengan penempatan rangkain seperti Gambar 9.

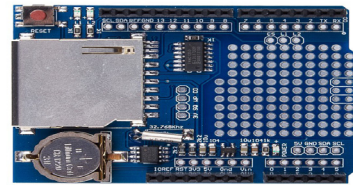
Pembacaan data dilakukan dengan melakukan sampling sebanyak 150 data dengan interval 2ms yang kemudian dihitung nilai rata-ratanya untuk mendapatkan nilai yang lebih akurat.

4. Sensor Kecepatan Angin

Sensor kecepatan angin yang digunakan mempunyai spesifikasi 4 buah kabel dengan pembagian 2 kabel daya



Gambar 9. Pengkabelan sensor arus DC ACS712



Gambar 10. data logger shield XD-204 dengan integrated RTC DS1307

yang dihubungkan dengan tegangan 12V dan 2 kabel data yaitu data dalam bentuk arus dan data dalam bentuk tegangan. Data dari sensor kecepatan angin yang dipakai dalam penelitian ini merupakan data tegangan analog yang dipasang pada pin analog A3 pada Arduino. Berikut ini adalah spesifikasi dari anemometer yang digunakan dalam penelitian

Model	: JL-FS2
Type	: three cups
Output signal range	: 0-5V (Voltage signal)
Supply voltage	: DC12-24V
Power consumption	: Voltage MAX≤0.3W
Start wind speed	: 0,4-0,8m/s
Resolution	: 0,1m/s
Effective range	: 0-30m/s
System error	: ±3%

5. Data Logger Shield dengan RTC

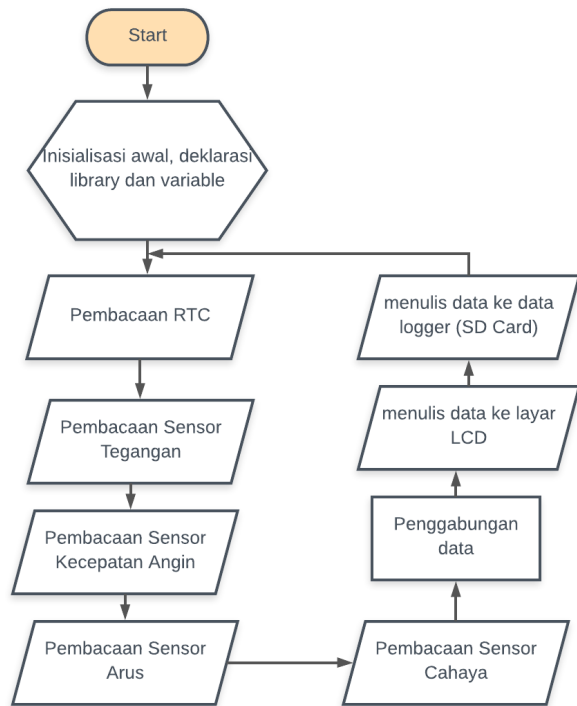
Gambar 10 memperlihatkan *Data logger* yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu *data logger shield* dengan tipe XD-204 yang sudah mempunyai RTC (*Real Time Clock*) dengan tipe DS1307 di dalamnya. Data pada RTC diakses menggunakan komunikasi I2C yang dilakukan secara parallel bersama dengan LCD dan sensor intensitas cahaya. Sedangkan komunikasi data dengan SD card dilakukan dengan menggunakan komunikasi serial. Data dari semua sensor yang terpasang pada Arduino kemudian dipantau dan ditulis dalam SD card [10]

RTC pada *shield* tersebut digunakan untuk mencatat waktu pengambilan data yang dilakukan secara periodik. Format pembacaan RTC yang digunakan dalam penelitian ini adalah dd/mm/yyyy untuk tanggal dan hh:mm:ss untuk waktu.

B. Analisis Perancangan Software

Perancangan software dilakukan dengan menggunakan software Arduino IDE dengan desain program seperti *Flowchart* pada Gambar 11.

Berdasarkan *flowchart* pada Gambar 11, program dimulai dengan melakukan inisialisasi *variable* dan *library* program terlebih dahulu. Pembacaan RTC (*Real Time Clock*) dilakukan pertama kali setelah inisialisasi awal. Setelah itu pembacaan sensor dilakukan secara berurutan mulai dari sensor tegangan, sensor kecepatan angin, sensor arus dan sensor cahaya. Data yang didapat dari pembacaan sensor kemudian disatukan dalam satu buah *variable string* yang selanjutnya ditulis ke dalam SD Card dengan format excel file .CSV [11] dengan interval 1–2 detik untuk setiap



Gambar 11. Flowchart program sistem pemantauan pengukuran potensi tenaga surya dan tenaga angin

kelompok data. Selain itu data hasil pembacaan juga di tampilkan pada layar LCD 2x16 secara langsung.

C. Uji Stabilitas Sistem

Pengujian ini dilakukan dengan menjalankan program selama 1 hari dan membandingkan data yang berhasil dibaca dan di tulis dalam SD card. Stabilitas sistem dapat diukur dari kelengkapan data selama satu hari apakah terdapat data yang hilang atau tidak.

Tabel 2 merupakan tabel sampel pengambilan data selama pengujian stabilitas sistem. Data pada kolom pertama merupakan tanggal pengambilan data. Pada kolom kedua merupakan waktu pengambilan data. Pada kolom ketiga merupakan data pembacaan arus dengan menggunakan ACS712. Data pada kolom keempat adalah

Tabel 2. Tabel sampel data pengujian stabilitas sistem

Date	Time	Current	Light	Wind	Volt
11/8/2018	9:06:32	0,67	46265	0,06	19,66
11/8/2018	9:06:34	0,67	46380	0,03	19,66
11/8/2018	9:06:35	0,67	46430	0,03	19,66
11/8/2018	9:06:36	0,66	46469	0,29	19,66
11/8/2018	9:06:37	0,67	46418	0,41	19,63
11/8/2018	9:06:38	0,66	46385	0,29	19,66
11/8/2018	9:06:39	0,67	46401	0,44	19,63
11/8/2018	9:06:40	0,67	46423	0,53	19,7
11/8/2018	9:06:41	0,67	46395	0,62	19,63
11/8/2018	9:06:43	0,67	45848	0,76	19,66
11/8/2018	9:06:44	0,67	46485	0,73	19,66

Tabel 3. Sampel hasil pengujian akurasi sensor tegangan

Nomor Pengujian	Tegangan sistem (V)	Tegangan multimeter (V)	Akurasi
1	5,9	6,0	98,3%
2	9,3	9,4	98,9%
3	11,6	11,6	100%
4	18,3	18,3	100%
5	20,2	20,1	99,5%

data hasil pembacaan intensitas cahaya menggunakan BH1750. Sedangkan data pada kolom kelima dan keenam merupakan data kecepatan angin dan tegangan yang dihasilkan PV sistem.

Dari Tabel 2 dapat diketahui bahwa pengambilan data dapat berjalan dengan baik dengan interval pengambilan data berkisar antara 1–2 detik tanpa ada data yang hilang.

D. Uji Akurasi Sistem

Dalam pengujian Akurasi, hasil data tegangan dan arus dari PV *system monocrystalline 50W* yang diukur sistem ditampilkan pada *serial monitor* dan LCD kemudian dibandingkan dengan alat ukur yang lain untuk menentukan ketepatan pengukuran alat. Dalam pengujian ini data yang diuji adalah data pada sensor tegangan, sensor arus, dan sensor cahaya.

Untuk pengujian sensor tegangan dan sensor arus pada sistem, data yang ditampilkan di layar LCD dibandingkan dengan data dari pengukuran multimeter digital yang sudah terkalibrasi. Tabel 3 merupakan tabel perbandingan nilai pengukuran sensor pada sistem dengan multimeter. Pengukuran dilakukan masing-masing sebanyak 100 kali untuk sensor tegangan dan sensor arus dengan menggunakan nilai tegangan yang bervariasi untuk setiap pengukurannya.

Dari sampel hasil pengukuran pada Tabel 3 dapat dihitung nilai akurasi dengan cara mengalikan hasil perbandingan pengukuran sistem dengan pengukuran alat pembanding. Sehingga dapat dihitung nilai rata-rata akurasi sensor tegangan hasil pengujian adalah sebesar 99,2%. sedangkan sampel dari data pengukuran arus dapat dilihat di Tabel 4.

Untuk pengujian arus, dapat dihitung akurasi rata-rata dari pengujian sebesar 95,3%.

Pengujian sensor cahaya dilakukan dengan membandingkan nilai pada LCD dengan nilai yang didapat dengan Lux Meter di Laboratorium Fakultas

Tabel 4. Sampel hasil pengujian akurasi sensor arus

Nomor Pengujian	Arus sistem (A)	Arus mutimeter (A)	Akurasi
1	0,05	0,05	100%
2	0,11	0,10	90,9%
3	0,27	0,25	92,6%
4	0,54	0,55	98,2%
5	0,89	0,89	100%

Tabel 5. Sampel hasil pengujian akurasi sensor cahaya

Nomor Pengujian	Intensitas cahaya sistem (Lux)	Intensitas Cahaya Lux Meter (Lux)	Akurasi
1	420	421	99,8%
2	662	664	99,7%
3	1109	1109	100%
4	14874	14870	99,9%
5	35791	35785	99,9%

Tabel 6. Sampel hasil pengujian presisi pengukuran sistem

Nomor Pengukuran	Tegangan sistem (V)	Arus sistem (A)	Intensitas Cahaya (Lux)
1	18,51	0,07	3560
2	18,51	0,07	3562
3	18,50	0,07	3561
4	18,51	0,07	3561
5	18,50	0,07	3560
6	18,50	0,07	3562
7	18,50	0,06	3560
8	18,50	0,07	3562
9	18,49	0,07	3560
10	18,50	0,07	3560

Teknik Udinus. Pengujian pada sensor ini juga dilakukan sebanyak 100 kali dengan nilai yang berbeda untuk setiap pengukurannya.

Pada Tabel 5, dapat diketahui bahwa tingkat akurasi rata-rata dari sensor cahaya BH1750 yang digunakan pada penelitian adalah 99,8%.

E. Uji Presisi Pengukuran Data

Sama seperti pengujian akurasi, pengujian ini dilakukan pada sensor tegangan, sensor arus dan sensor cahaya dengan melakukan sepuluh kali pengukuran terhadap satu kondisi yang sama kemudian dihitung berapa besar simpangan dari setiap pengukuran yang dilakukan.

Dari Tabel 6 hasil pengujian di atas, dapat diketahui bahwa tingkat presisi dari sensor tegangan, sensor arus, dan sensor cahaya BH1750 yang digunakan pada penelitian dapat diketahui dengan menghitung nilai simpangan baku relatif (RSD) dengan menggunakan rumus pada (1) Dimana merupakan rata-rata hasil pengukuran. Simpangan baku (SD) dapat dicari dengan menggunakan rumus pada (2).

Dengan menghitung nilai simpangan baku relatif dan simpangan baku menggunakan (1) dan (2), dapat diperoleh nilai RSD pada sistem pemantauan pengukuran potensi tenaga matahari dan angin untuk sensor tegangan, sensor arus, dan sensor cahaya sebesar 0,034%, 4,58%, dan 0,026% yang menunjukkan bahwa presisi dari pengujian tersebut tinggi dikarenakan nilai RSD yang dihasilkan rendah.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah menghasilkan sistem biaya rendah pemantauan dan pengukuran potensi tenaga matahari dan tenaga angin yang mampu memantau dan mencatat data potensi tenaga matahari berupa tegangan, arus dari panel surya, dan intensitas cahaya dengan tingkat akurasi dan SDR sensor tegangan sebesar 99,2% dan 0,034%, sensor arus sebesar 95,3% dan 4,58% dan sensor cahaya sebesar 99,8% dan 0,026%.

Sistem ini juga mampu memantau dan mencatat potensi tenaga angin berupa kecepatan angin hingga 30m/s dengan stabil dan mampu beroperasi secara terus menerus selama satu bulan masa penelitian dengan memanfaatkan panel surya untuk melakukan pengisian baterai. Sistem ini dapat beroperasi dengan semua jenis Panel Surya dengan maksimal tegangan 34,7 V dan maximal arus ± 30 A.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis Mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi atas pendanaan pada penelitian ini melalui Skema Hibah Penelitian Dosen Pemula (PDP) (053/A38.04/UDN-09/II/2018).

REFERENSI

- [1] Winasis, W. Azis, R. Imron, and S. Fajar, "Desain Sistem Monitoring Sistem Photovoltaic Berbasis Internet Of Things (IoT)," *Jurnal Nasional Teknik Elektro Teknik Informatika (JNTETI)* Vol. 5, No. 4, p.328-333 November 2016
- [2] T. Hamdani, (View Sept. 2018). "Arcandra Paparkan 3 Kunci Kembangkan Energi Terbarukan di RI [Online]," Available: <https://finance.detik.com/energi/d-3987615/arcandra-paparkan-3-kunci-kembangkan-energi-terbarukan-di-ri>
- [3] M. Pamungkas., H. Hafiddudin, and Y. S. Rohmah, "Perancangan dan Realisasi Alat Pengukur Intensitas Cahaya," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, Vol. 3, No. 2, p.120-132, 2015.
- [4] M. Fuentes, M. Vivar, J. M. Burgos, J. Aguilera, and J. A. Vacas, "Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for PV system monitoring using Arduino™ that complies with IEC standards," *Solar Energi Materials and Solar Cells*, Vol.130, p.529-543, November 2014.
- [5] A.F. Farizy, D.A. Asfani. "Desain Sistem Monitoring State Of Charge Baterai Pada Charging Station Mobil Listrik Berbasis Fuzzy Logic Dengan Mempertimbangkan Temperature". *Jurnal Teknik ITS*, Vol.5, No.2, p.278-282, Oktober 2016.
- [6] E. Machmud, "Rancang Bangun Maximum Power Point Tracking (MPPT) Solar Sel Untuk Aplikasi Pada Sistem Grid Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA)," *Jurnal Gamma Universitas Muhammadiyah Malang* Vol.9, No.1, p.170-178 September 2013.
- [7] Z. Arifin, and H. Rahadian, "Rancang Bangun Stand-Alone Automatic Rain Gauge (ARG) Berbasis Panel Surya," *Jurnal Nasional Teknik Elektro* Vol.6, No.3, p. 178-184, 2017.
- [8] The National Optical Astronomy Observatory NOAO, (View Jun. 2018). "Recommended Light Levels (Illuminance) for Outdoor and Indoor Venues" Available: https://www.noao.edu/education/QLTkit/ACTIVITY_Documents/Safety/LightLevels_outdoor+indoor.pdf.
- [9] O. Dwiyanto, "Kwh Meter Digital Dengan Sensor Arus Acs712

- Berbasis Mikrokontroler Atmega 32,” Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2010.
- [10] M. Ikhsan, and Y. Away, “Teknik Reduksi Energi pada Perancangan Data Logger Parameter Matahari,” Jurnal Rekayasa Elektrika, Vol.11, No.1, p.30-35, 2014.
- [11] M. R. Fachri, I. D. Sara, and Y. Away, “Pemantauan Parameter Panel Surya Berbasis Arduino secara Real Time,” Jurnal Rekayasa Elektrika, Vol.11, No.4, p.123-128, 2015.

Optimasi Penempatan dan Kapasitas PLTS on grid pada Sistem Distribusi Radial Menggunakan Metode Algoritma Genetika Multi Konstrain

Muammar Zainuddin¹ dan Haditsah Annur²

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Ichsan Gorontalo

²Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Ichsan Gorontalo

Jl. Drs. Achmad Najamuddin, Kota Gorontalo 96138

e-mail: muammarz@unisan.ac.id

Abstrak—Peluang bisnis pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) terhubung ke sistem distribusi (*on grid*) membawa tantangan tersendiri terhadap kualitas daya dan fluktuasi tegangan pada sistem distribusi. Tujuan penelitian ini untuk mengoptimalkan lokasi dan kapasitas daya PLTS *on grid* agar nilai tegangan yang dihasilkan sesuai standar operasi dan memenuhi persyaratan teknik penyambungan pada sistem distribusi. Sistem distribusi yang diuji yaitu penyulang distribusi radial 69 Bus. Metode yang diusulkan menggunakan teknik optimasi algoritma genetika. Nilai batasan optimasi diusulkan menggunakan tiga batasan yaitu batas nilai tegangan, batas nilai kapasitas daya aktif PLTS, dan batas total kapasitas daya aktif PLTS. Optimasi dilakukan sebanyak tiga kali simulasi dengan mempertimbangkan nilai persentase total kapasitas daya aktif PLTS terhadap total beban sistem distribusi. Hasil optimasi yang diusulkan pada simulasi-1 ditemukan 7 lokasi *grid* dengan total daya aktif 1,156 MW (38% PV) dan menghasilkan nilai fitness 0,029. Simulasi-2 ditemukan 7 lokasi dengan total daya aktif 1,243 MW (41% PV) dan menghasilkan nilai fitness 0,023. Pada simulasi-3 ditemukan 11 lokasi dengan total daya aktif 1,385 MW (46% PV) dan menghasilkan nilai fitness 0,022. Nilai *fitness* terbaik merupakan nilai rugi-rugi daya aktif terendah. Masuknya sejumlah sistem PLTS *on grid* dengan lokasi tersebar pada jaringan dapat meningkatkan level tegangan sistem distribusi.

Kata kunci: *PLTS on grid, algoritma genetika, multi konstrain, rugi-rugi daya, jatuh tegangan*

Abstract—The photovoltaic grid-connected business opportunity offers challenges to power quality and voltage fluctuations in the distribution system. The purpose of this study is to optimize the location and power capacity of the grid-connected photovoltaic so that the voltage values are in accordance with the operating standards and meet the requirements of the connection techniques in the distribution system. The distribution system tested is the 69 Buses radial distribution feeder. The optimization uses three constraints namely voltage constraints, active power capacity constraints and total active power capacity constraints of the Grid-Connected Photovoltaic. The Optimization is carried out by considering the value of the percentage of the total active power of the Grid-Connected Photovoltaic capacity to the total load in the distribution system. The optimization results in the first simulation indicated 7 grid locations with a total active power of 1.156 MW (38% PV) and produced a fitness value of 0.029. The second Simulation showed 7 locations with a total active power of 1.243 MW (41% PV) and produced a fitness value of 0.023. The Third simulation was identified with 11 locations with a total active power of 1.385 MW (46% PV) and produced a fitness value of 0.022. The best fitness value is the lowest value of the active power losses. The entry of a number of the Grid-Connected Photovoltaic System with distributed location can increase the voltage level in the distribution system.

Keywords: *grid-connected photovoltaic, genetic algorithm, multi constraint, losses, voltage drop*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa ElektriKA. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *rooftop on grid* saat ini menjadi trend terbaru model bisnis kelistrikan di Indonesia. PLTS *rooftop on grid* mendorong pengalaman pelanggan listrik di Era *Electricity* 4.0. Dukungan perusahaan penyedia listrik negara dalam implementasi PLTS *rooftop on grid* oleh pelanggan yaitu dengan

menyediakan fasilitas paralel dan membuat skema bisnis ekspor-impor daya listrik. Salah satu inovasi disruptif listrik 4.0 yaitu masyarakat memiliki kebebasan untuk memenuhi kebutuhan listriknya sendiri dan dapat menjual listriknya kepada pihak lain. Hal tersebut didukung oleh terbitnya Peraturan Menteri ESDM No. 49 Tahun 2018 [1]. Namun, bisnis PLTS *rooftop on grid* menjadi tantangan tersendiri terhadap penyediaan *reserve margin*

yang cukup dan tepat untuk mengimbangi *intermittensi solar photovoltaic* (PV) [2] reduce pollution and expand the nation's green spaces. Part of the plan is to promote the integration of solar photovoltaics (PVs. Permasalahan lainnya yaitu *reliability* dan *power quality* konsumen PLTS *rooftop on grid* harus tetap terjaga.

Penerapan PLTS *on grid* dan tersebar (*Distributed Generation-DGs*) di Indonesia menjadi salah satu solusi untuk memaksimalkan potensi energi terbarukan di suatu wilayah, mengurangi pemakaian bahan bakar minyak oleh pembangkit konvensional, dan peningkatan kualitas daya listrik [3] governed by state or provincial incentives and/or mandated by green-generation portfolio requirements, are facing installations of large PV plants with capacities in the order of several megavoltamperes (MVAs. PLTS *on grid* memiliki peran terhadap kualitas daya pada sistem distribusi. Peran tersebut yaitu memperbaiki nilai tegangan, memperbaiki dampak ketidakseimbangan beban, menurunkan kejadian fluktuasi daya aktif dan reaktif, meningkatkan faktor daya, menurunkan angka rugi-rugi daya dan memperbaiki nilai keandalan sistem [4], [5] incentives, technology developments and cost reduction. PV installed capacities can vary from a few kW (small-scale. Ukuran kapasitas daya PLTS *on grid* akan menentukan skala utilitas titik hubung pada *grid*. Ukuran daya skala kecil terhubung pada saluran distribusi sekunder, ukuran skala sedang untuk perumahan dan bangunan komersil terhubung pada sistem distribusi primer atau sekunder, dan ukuran daya skala besar terhubung pada saluran tiga fasa distribusi primer [6] governed by state or provincial incentives and/or mandated by green-generation portfolio requirements, are facing installations of large PV plants with capacities in the order of several megavoltamperes (MVAs, [7]. Ketidakseimbangan daya sistem PLTS pada saat terhubung pada penyulang distribusi berdampak pada fluktuasi tegangan di titik sambung [8]. Hal tersebut disebabkan oleh perbedaan level jatuh tegangan di sepanjang penyulang dan perubahan radiasi matahari. Menghubungkan PLTS pada penyulang distribusi harus memenuhi persyaratan teknik penyambungan yaitu pemilihan lokasi (*placement*) dan kapasitas (*sizing*) daya PLTS [9] dan tidak membawa dampak yang buruk terhadap nilai tegangan. Berdasarkan persyaratan tersebut maka dibutuhkan perhitungan optimal dalam penentuan lokasi titik hubung dan ukuran daya PLTS *on grid*.

Penentuan lokasi *on grid* dan kapasitas daya PLTS diusulkan menggunakan teknik optimasi. Teknik optimasi yang diusulkan pada penelitian ini menggunakan metode Algoritma Genetika (*Genetic Algorithm*). Metode optimasi ini telah digunakan pada beberapa studi terkait pembangkitan tersebar (DGs) untuk mengoptimalkan dampak positif terhadap kehadiran sejumlah pembangkit kecil pada sistem distribusi [10], [11]. Namun sistem DG yang dibahas pada studi tersebut belum membedakan jenis sumber energi dan karakteristik pembangkitnya. Sistem DG dianggap sebagai penyuplai daya aktif dan daya reaktif pada grid. Hal yang sama juga telah dilakukan pada studi penempatan optimal peralatan listrik seperti bank kapasitor

pada sistem distribusi listrik [12], [13]. Oleh karena itu pada penelitian ini spesifik membahas implementasi pembangkit listrik tenaga surya yang terhubung pada grid dan tersebar dalam satu sistem distribusi radial.

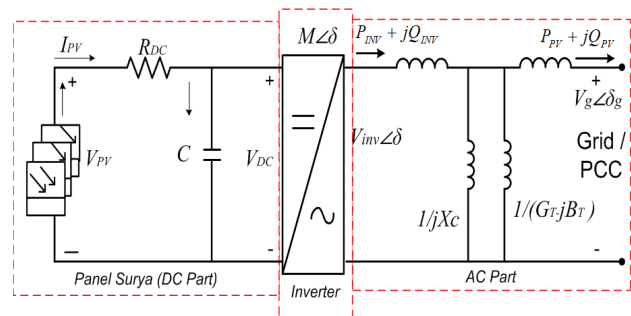
Tujuan penelitian ini yaitu menentukan lokasi titik hubung (*on grid*) dan ukuran kapasitas daya yang optimal pada PLTS agar nilai tegangan yang dihasilkan sesuai standar aturan jaringan sistem tenaga listrik 20 kV (+5% atau -10% dari tegangan nominal) dan memenuhi persyaratan teknik penyambungan pembangkit energi terbarukan pada sistem distribusi [9]. Analisis aliran daya pada sistem distribusi dilakukan untuk melihat hasil perbandingan rugi-rugi daya dan profil tegangan setelah hadirnya PLTS *on grid* pada penyulang distribusi radial.

II. STUDI PUSTAKA

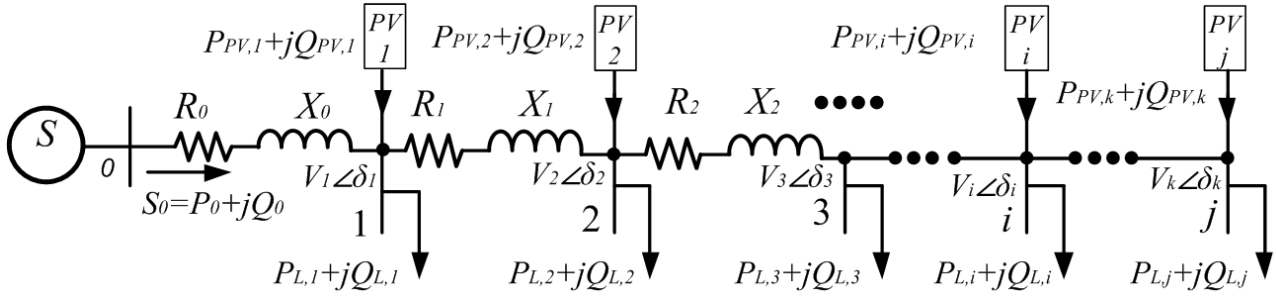
A. Sistem PLTS on Grid

Sistem PLTS *on grid* berbeda dari segi utilitas karakteristiknya dengan pembangkit lainnya. Perbedaan paling mendasar adalah tidak adanya penggunaan peralatan yang sifatnya mekanis pada proses konversi energi matahari. Gambar 1 ditampilkan diagram sistem PLTS *on grid* yang terdiri dari bagian listrik DC (Panel Surya), bagian inverter yang berperan untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC, dan bagian listrik AC yang terhubung dengan transformator sistem distribusi [14]. Dalam rangkaian ini dapat diketahui aliran daya dan nilai tegangan sistem PLTS ke dalam *grid*. Apabila radiasi matahari, suhu *cell PV* dan tegangan pada titik sambung *point of common coupling* (PCC) diketahui maka variabel daya pada sistem PV dapat dinilai. Ketika pembangkit surya *photovoltaic* (PV) bertindak sebagai bus PQ, maka nilai P_{PV} dan Q_{PV} bernilai nol. Hal tersebut terjadi apabila pembangkit PV tidak berkontribusi dalam pengaturan tegangan *grid* dan tidak mengeksport daya listrik (radiasi matahari 0 W/m²) [15]. Tegangan PCC diperoleh dengan memasukkan nilai daya yang diekspor dari sistem PLTS ke dalam analisa aliran daya. Dimana V_{PV} adalah tegangan output pada PV array (*direct current-dc*). V_{INV} adalah tegangan output inverter yang terhubung dengan transformator. $R_T + jX_T$ adalah nilai resistansi dan reaktansi pada transformator.

Daya aktif yang dikirim oleh inverter (P_{INV}) dan daya aktif pada titik sambung grid (P_{PV}) mengalami perubahan



Gambar 1. Diagram sistem PLTS *on grid* [16]



Gambar 2. Model PLTS on grid pada sistem distribusi radial

nilai berdasarkan arus dan tegangan (I - V) pada PV array. Perubahan I - V mengikuti perubahan radiasi matahari selama operasi PLTS. Aliran daya kompleks (S) dari inverter sistem PLTS sampai ke dalam grid dinyatakan dengan Persamaan (1)-(4) :

$$\tilde{S}_{INV} = P_{INV} + jQ_{INV}, \quad (1)$$

$$\tilde{S}_{PV} = P_{PV} + jQ_{PV} = V_g \angle \delta_g (-I_{INV})^*, \quad (2)$$

$$P_{PV} = \frac{V_{INV} V_g}{X_T} \sin(\theta_g - \theta_{INV}), \quad (3)$$

$$Q_{PV} = \frac{V_{INV}^2}{X_T} - \frac{V_{INV} V_g}{X_T} \cos(\theta_g - \theta_{INV}). \quad (4)$$

Beban listrik pada inverter PLTS on grid adalah beban pada grid (P_L). Pada Gambar 2 ditampilkan model PLTS on grid pada sistem distribusi radial [17]. Kualitas nilai arus (I_{PV}) dan output tegangan PV (V_{PV}) dengan arus (I_{AC}) dan tegangan (V_{AC}) pada grid merupakan standar utama prasyarat sistem PV terhubung ke grid. Inverter PLTS dilengkapi dengan sistem proteksi yang dirancang dari sistem tenaga listrik. Sistem PLTS dapat terputus (*off Grid*) untuk mencegah inverter dari arus gangguan hubung singkat yang besar dan pada saat inverter tidak dapat mengirimkan daya ke beban.

Sistem PLTS terhubung dengan grid melalui sebuah inverter yang berfungsi sebagai konverter daya AC yang sebelumnya merupakan daya DC dari panel surya. Sistem distribusi radial terdiri dari sejumlah bus sebanyak- j , maka diasumsikan bus ke-0 (bus awal) merupakan slack-bus. Pada kondisi praktis nilai beban pada sistem tenaga listrik merupakan persamaan daya. Arah arus keluaran sistem PLTS on grid searah dengan arah arus beban, maka persamaan tegangan pada bus- i sampai ke bus- j diuraikan menurut persamaan aliran daya.

B. Persamaan Aliran Daya pada Sistem Distribusi Radial

Studi aliran daya digunakan untuk menghitung besaran nilai perubahan tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran. Apabila nilai skalar tegangan $|V|$ dan sudut fasa δ awal telah diketahui, selanjutnya iterasi awal dilakukan untuk menghitung nilai daya aktif dan tegangan (P-V) serta nilai daya aktif dan daya reaktif (P-Q) pada masing-masing bus

beban [18], [19].

Saluran distribusi dimodelkan sebagai persamaan impedansi seri (5);

$$Z_i = R_i + jX_i. \quad (5)$$

PLTS pada bus- i dimodelkan sebagai sumber daya konstan yang dituliskan (6);

$$S_{PV,i} = P_{PV,i} + jQ_{PV,i}, \quad (6)$$

Persamaan (7) yaitu suplai daya utama dari gardu induk;

$$S_0 = P_0 + jQ_0, \quad (7)$$

daya semu (S) dan nilai tegangan pada ujung bus terima dari cabang pertama diuraikan (8) dan (9);

$$S_1 = S_0 - S_{loss,1} - Z_1 \frac{(P_0^2 + Q_0^2)}{|V|^2} - S_{L,1}, \quad (8)$$

tegangan pada ujung penerima selanjutnya direpresentasikan melalui Persamaan (10);

$$V_i = \left(V_0 - \frac{P_0 R_i + Q_0 X_i}{V_0} \right) - j \left(\frac{P_0 X_i + Q_0 R_i}{V_0} \right), \quad (10)$$

$$\theta_i = -\tan^{-1} \left(\frac{(P_0 X_i + Q_0 R_i) / V_0}{(P_0 R_i + Q_0 X_i) / V_0} \right). \quad (11)$$

Daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) pada bus penerima lainnya $j = (i+1)$ dapat dituliskan dengan Persamaan (12) dan (13),

$$P_j = P_i - R_j \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} - P_{L,j} + P_{PV,j}, \quad (12)$$

$$Q_j = Q_i - X_j \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} - Q_{L,j} + Q_{PV,j}, \quad (13)$$

besaran tegangan magnitudo pada ujung bus penerima dituliskan melalui Persamaan (14);

$$|V_j|^2 = |V_i|^2 - 2(P_j R_i + X_j G_i) + (R_j^2 + X_j^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2}, \quad (14)$$

V_i adalah besarnya tegangan pada bus i .

Persamaan aliran daya dan perubahan nilai tegangan baru dapat dicapai melalui proses iterasi. Apabila nilaidan belum konvergen pada iterasi pertama maka pembentukan elemen matriks *Jacobian* dilakukan selanjutnya. Persamaan (15) dan (16) adalah persamaan untuk menghitung nilai sudut fasa $\delta^{(k+1)}$ dan tegangan $V^{(k+1)}$ yang baru dari bus-*i* ke bus-*j*,

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)}, \quad (15)$$

$$V_i^{(k+1)} = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}|, \quad (16)$$

daya yang mengalir dari bus-*i* ke bus-*j* atau sebaliknya dari bus-*j* ke bus-*i* didefinisikan dengan Persamaan (17),

$$S_{ij} = P_{ij} + Q_{ij}. \quad (17)$$

Proses iterasi selanjutnya dilakukan apabila telah diperoleh nilai tegangan dan sudut fasa yang baru. Persamaan (18) adalah perhitungan rugi-rugi daya (S_{loss}) pada penyulang distribusi radial *i-j* (bus-*i* ke bus-*j* dan sebaliknya) dituliskan:

$$S_{Loss,ij} = S_{ij} + S_{ji}. \quad (18)$$

apabila nilai konvergen telah terpenuhi maka proses iterasi akan berhenti.

C. Metode Algoritma Genetika

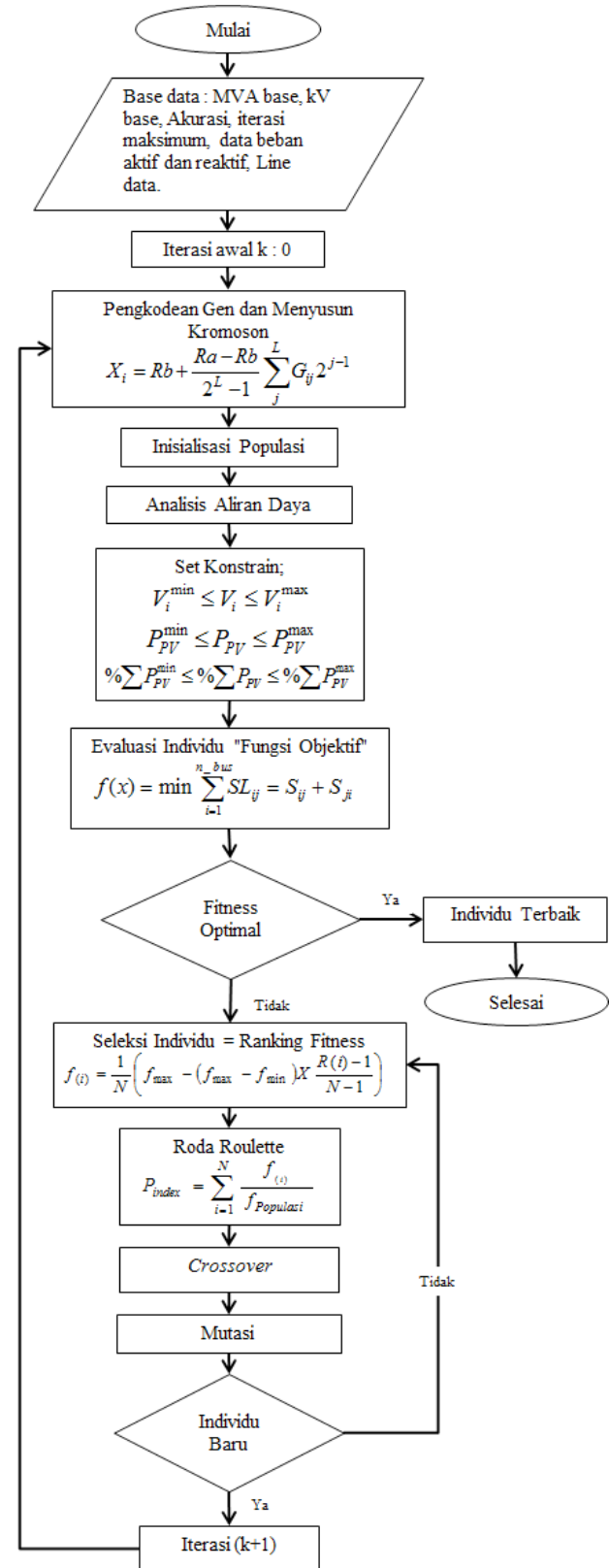
Metode algoritma genetika dengan berbagai teknik dalam kasus pencarian lokasi dan kapasitas optimal pada pembangkit maupun peralatan listrik telah dilakukan oleh beberapa peneliti dunia. Metode algoritma genetika pada kasus pencarian lokasi dan kapasitas pembangkit tersebar (*Distributed Generations*) dapat menurunkan rugi-rugi daya dan meningkatkan indeks tegangan bus pada sistem distribusi yang lemah [20], [21]. Kombinasi Algoritma Genetika, PSO, dan WIPSO dapat meningkatkan kestabilan tegangan [22]–[24]. Penempatan optimal bank kapasitor dan unit DG pada sistem distribusi radial menggunakan algoritma genetika untuk meminimalkan rugi-rugi daya dan mengurangi dampak harmonisa [25].

Algoritma genetika bekerja berdasarkan prinsip karakteristik evolusi suatu makhluk hidup. Titik fokus dalam melakukan proses optimasi tersebut yaitu representasi individu, penentuan individu terbaik (nilai fitness) dengan penerapan batasan nilai (konstrain) setiap individu, dan perkawinan silang hingga menemukan individu keturunan terbaik. Nilai Fitness dari kromosom bermanfaat pada proses selanjutnya, yaitu sebagai perbandingan besarnya fungsi obyektif pada setiap kromosom. Fungsi obyektif nantinya akan diurutkan menjadi indeks kromosom yang akan dipilih menjadi individu baru yang akan mengalami kawin silang berikutnya.

III. METODE

Alur penyelesaian metode optimasi algoritma genetika berdasarkan tujuan penelitian ini ditampilkan pada Gambar 3.

Implementasi hasil algoritma genetika pada penelitian ini adalah menentukan kandidat titik (bus) paralel dengan PLTS *on grid* beserta kapasitas dayanya. Sistem distribusi radial yang diuji adalah sistem 69 bus. Dalam mengidentifikasi letak PLTS pada bus dan



Gambar 3. Diagram alir program algoritma genetika

kapasitas dayanya digunakan sejumlah kromosom yang merepresentasikan nilai masing-masing kapasitas daya dan lokasinya. Berikut penjelasan alur tahapan algoritma genetika sesuai Gambar 3.

1. *Pengkodean Gen dan Menyusun Kromosom*; bit pertama pada satu string kromosom merupakan Gen-1. Apabila bit pertama bernilai biner 1 menandakan suatu kondisi sebuah bus dengan PLTS didalamnya. Apabila bit pertama bernilai 0 memberikan informasi sebuah bus tanpa PLTS. Kelompok Gen kedua sampai gen terakhir merepresentasikan ukuran kapasitas PLTS. Skema pengkodean biner pada kapasitas daya PLTS on grid diberikan oleh Persamaan (19),

$$X_i = R_b + \frac{Ra - Rb}{2^L - 1} \sum_j^L G_{ij} 2^{j-1}, \quad (19)$$

dimana R_a adalah atas atas variabel (P_{min}), R_b batas bawah variabel (P_{maks}), L panjang/jumlah bit pengkodean, G_{ij} nilai bit (0 atau 1) dari sebuah Gen pada suatu kromosom, 2^{j-1} koefisien *decoding* dari urutan Gen, dan X_i nilai riil suatu variabel.

2. *Menentukan Nilai Fitness Optimal* (terbaik) melalui fungsi minimisasi angka rugi daya aktif (P).

Fungsi objektif rugi-rugi daya aktif,

$$X_i = R_b + \frac{Ra - Rb}{2^L - 1} \sum_j^L G_{ij} 2^{j-1}. \quad (20)$$

3. *Menentukan set Konstrain*; dalam kasus pencarian lokasi dan kapasitas daya yang optimal pada PLTS on grid diberikan tiga batasan atau konstrain sebagai pertimbangan terhadap standar aturan jaringan pada sistem distribusi listrik.

- **Konstrain 1: batas kapasitas daya aktif PLTS (P_{PV})**

$$P_{PV}^{min} \leq P_{PV} \leq P_{PV}^{maks}, \quad (21)$$

nilai batas kapasitas daya PLTS on grid untuk satu lokasi yaitu $P_{min} = 30$ kW, dan $P_{maks} = 200$ kW, sesuai batas kapasitas terhubung pada sistem distribusi di luar pulau jawa [9].

- **Konstrain 2: batas total kapasitas daya aktif PLTS ($\% \sum P_{PV}$)** terhadap total beban penyulang $\sum P_{beban}$,

$$\% \sum P_{PV}^{min} \leq \% \sum P_{PV} \leq \% \sum P_{PV}^{maks}, \quad (22)$$

nilai batas total kapasitas daya aktif PLTS terhadap total beban penyulang yaitu $\% \sum P_{PV} (\min) = 25\%$ dan $\% \sum P_{PV} (\maks) = 50\%$.

- **Konstrain 3; Batas tegangan bus (V_i):**

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{maks}, \quad (23)$$

Nilai batas tegangan bus yaitu $V_{min} = 0,95$ p.u, dan $V_{maks} = 1,05$ p.u, sesuai standard tegangan -10% dan +5% [9].

4. *Ranking Fitness*; Penskalaan nilai fitness diterapkan

untuk menyeleksi masing-masing individu, sehingga nilai fitness berada pada interval $f_{maks} - f_{min}$.

$$f_{(i)} = \frac{1}{N} \left(f_{maks} - (f_{maks} - f_{min}) * \frac{R_{(i)} - 1}{N - 1} \right), \quad (24)$$

dimana $f(i)$ adalah nilai fitness suatu individu (i), f_{maks} nilai fitness maksimum, f_{min} nilai fitness minimum, N jumlah populasi, dan $R(i)$ ranking individu ke- i .

5. *Roda Roulette* yaitu membuat nilai interval 0-1 dari nilai-nilai fitness suatu kromosom kemudian dibagi dengan nilai total fitness dari seluruh kromosom,

$$P_{index} = \sum_{i=1}^N \frac{f_{(i)}}{f_{Populasi}}. \quad (25)$$

6. *Crossover* (Pindah Silang); secara random dipilih satu titik potong, kemudian dari orang tua-1 bagian pertama digabungkan dengan orang tua-2 bagian kedua dari satu kromosom dalam satu populasi (P_c = Probabilitas *Crossover*).

$$Pindah\ silang = P_c \times Jumlah\ Gen. \quad (26)$$

7. *Mutasi* yaitu dengan mengubah gen yang sama kemudian ditukar dengan nilai kebalikannya (nilai 1 diubah menjadi 0, dan sebaliknya).

Pada penelitian ini dilakukan tiga kali simulasi optimasi dengan memperhitungkan batasan optimal peningkatan jumlah daya PV ($\% \sum P_{PV}$) yaitu peningkatan jumlah daya aktif (Watt) dari 25% sampai dengan 50% dari total beban penyulang. Hal ini diperlukan agar nilai agregat batas kapasitas PLTS on grid tidak melewati batas kapasitas beban pada penyulang. Dalam menyusun Algoritma Genetika, ditentukan beberapa parameter optimasi yaitu; Jumlah Gen = 10; Jumlah Populasi = 69; Kromosom = Ukuran populasi x Jumlah Gen; Jumlah Populasi = 100; Probabilitas *Crossover* = 0,80; Probabilitas Mutasi = 0,05.

Optimasi algoritma genetika pada setiap simulasi diterapkan berdasarkan tiga batasan (konstrain) yaitu (1) konstrain kapasitas daya aktif PLTS, (2) konstrain total kapasitas daya aktif PLTS dan (3) konstrain tegangan pada bus. Konstrain pertama yaitu batas kapasitas daya aktif di setiap lokasi PLTS dimaksudkan untuk memperoleh nilai kapasitas daya aktif maksimal untuk satu sistem PLTS pada satu lokasi grid. Konstrain kedua yaitu konstrain total kapasitas daya aktif PLTS yang dimaksudkan agar nilai total daya aktif PLTS secara keseluruhan dalam satu penyulang tidak melewati batas kapasitas beban pada penyulang. Konstrain ketiga dimaksudkan untuk memperoleh nilai tegangan pada sistem distribusi sesuai standar aturan jaringan.

Sistem distribusi radial yang diuji menggunakan algoritma genetika yaitu penyulang distribusi 69 bus. Gambar 4 menampilkan *single line diagram* saluran

distribusi. Beban daya aktif dan reaktif pada saluran distribusi yaitu 3,036 MW dan 1,833 Mvar. Pada Gambar 5 ditunjukkan grafik profil beban dan tegangan bus pada sistem distribusi kondisi awal (*existing*).

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

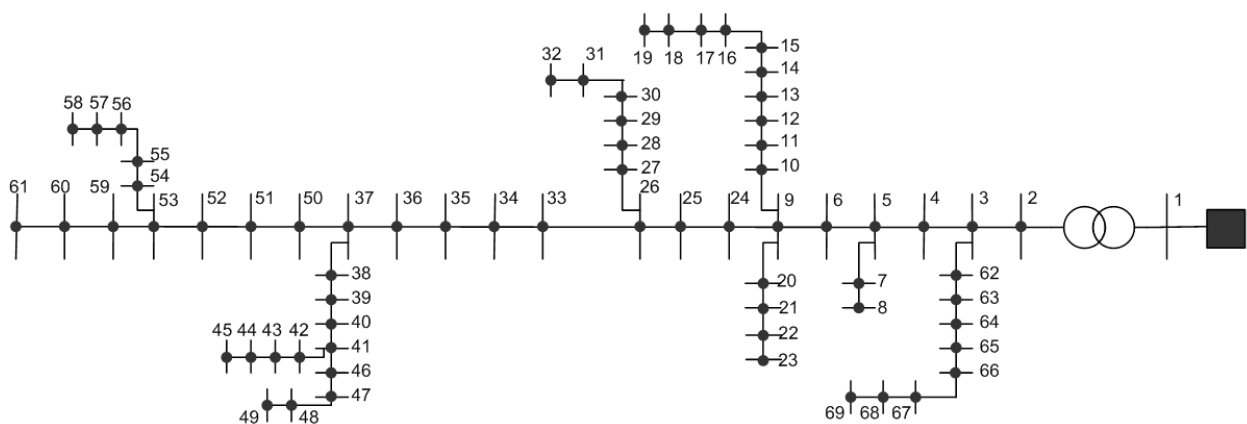
Hasil analisis aliran daya kondisi awal sistem distribusi tanpa kehadiran PLTS didalamnya menghasilkan total rugi-rugi daya aktif pada sistem distribusi yaitu sebesar 0,075 MW dari jumlah daya yang mengalir dari sumber daya utama ke beban yaitu sebesar 3,111 MW. Gambar 6 menampilkan grafik hasil optimasi sebagai fungsi minimisasi rugi-rugi daya aktif dari metode algoritma genetika multi konstrain. Nilai fungsi minimisasi rugi-rugi daya aktif merupakan nilai fitness terbaik. Berdasarkan hasil optimasi algoritma genetika dengan mengamati konstrain yang diterapkan, menemukan sejumlah variasi lokasi dan ukuran kapasitas daya PLTS *on grid* yang optimal.

Hasil simulasi-1 ditunjukkan pada Gambar 6(a) dimana konstrain 1 menghasilkan 7 lokasi bus serta kapasitas daya yang optimal masing-masing PLTS *on grid*. Konstrain 2 menghasilkan total kapasitas daya aktif PLTS *on grid* yaitu 1,156 MW pada nilai fitness 0,029 MW. Konstrain 3 menghasilkan profil tegangan paling terendah pada bus bus yaitu 0,96 p.u. Hasil optimasi GA pada simulasi-2

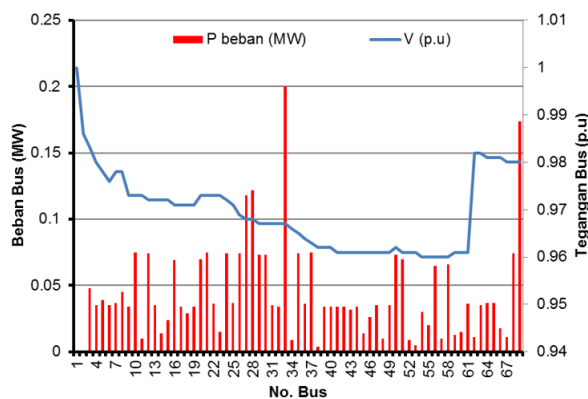
ditampilkan pada Gambar 6(b). Konstrain 1 menghasilkan 7 lokasi optimal serta kapasitas daya yang berbeda dari simulasi-1. Konstrain 2 menghasilkan total kapasitas daya aktif sebesar 1,243 MW atau sebesar 41% dari total beban penyulang. Pada konstrain 3 menghasilkan profil tegangan seluruh bus yang semakin naik atau semakin membaik. Nilai tegangan bus terendah yaitu 0,972 p.u. Optimasi pada simulasi-2 menghasilkan fitness terbaik pada nilai 0,023 MW. Hasil simulasi-3 yang ditampilkan pada gambar 6(c) menemukan adanya peningkatan jumlah sebaran lokasi PLTS *on grid*. Terdapat 11 lokasi serta kapasitas daya yang optimal untuk penerapan PLTS *on grid*. Total kapasitas daya aktif PLTS *on grid* sebesar 46% atau 1,385 MW dari total beban penyulang. Konstrain 3 menghasilkan profil tegangan setiap bus semakin naik dan atau semakin membaik. Nilai tegangan terendah pada bus yaitu 0,973 dan menghasilkan nilai fitness 0,022 MW.

Variasi lokasi injeksi (*grid*) dan kapasitas daya PLTS ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan hasil simulasi optimasi diperoleh nilai rugi-rugi daya aktif paling terkecil yaitu pada optimasi simulasi-3. Pada simulasi-3, jumlah dan sebaran lokasi PLTS *on grid* berbeda dengan simulasi-1 dan simulasi-2. Hal ini disebabkan oleh algoritma genetika yang diterapkan telah memenuhi batas konstrain yang telah ditetapkan.

Perbandingan tegangan bus pada penyulang sebelum dan setelah optimasi GA ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 4. Single line diagram sistem distribusi radial 69 bus



Gambar 5. Profil beban dan tegangan sistem distribusi kondisi awal

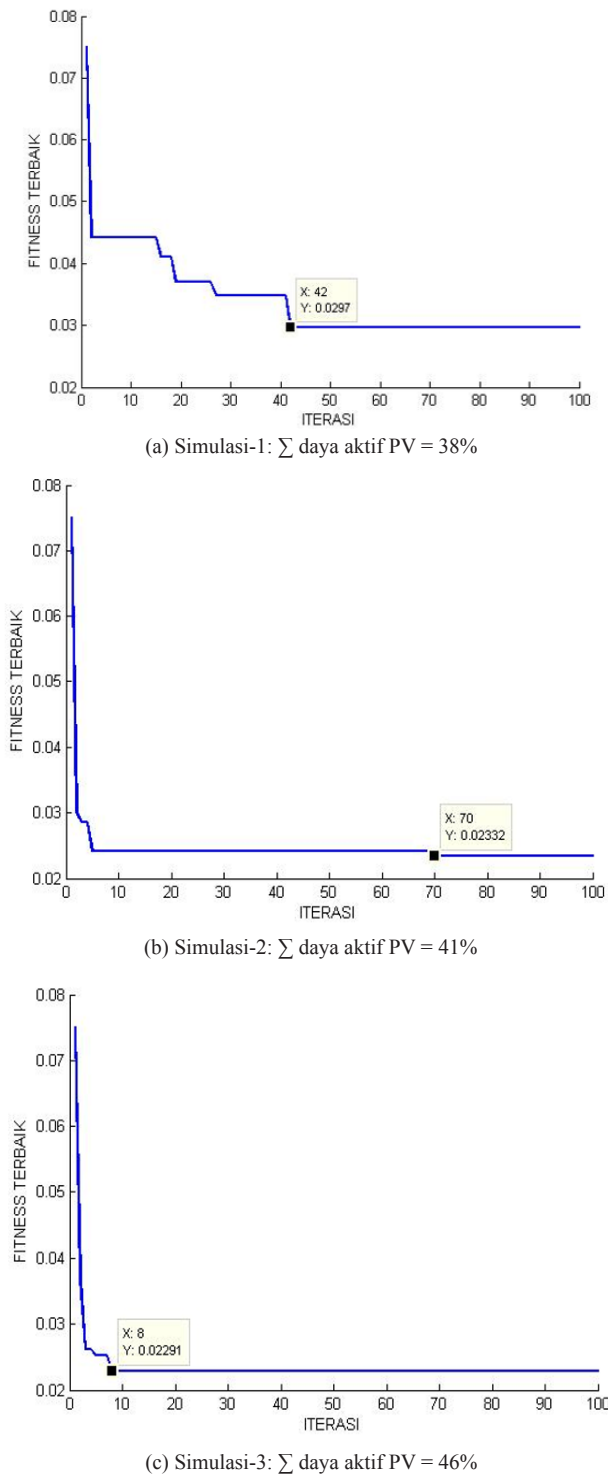
Masuknya sistem PLTS pada saluran distribusi pada beberapa lokasi dapat menurunkan total rugi-rugi daya dan memperbaiki nilai tegangan bus. Setelah masuknya PLTS berdasarkan hasil optimasi maka diperoleh nilai profil tegangan pada bus mengalami kenaikan. Perbandingan dari ketiga hasil simulasi menunjukkan kualitas tegangan terbaik berada pada simulasi-3 (46% PV). Penempatan lokasi PLTS *on grid* yang optimal berpengaruh pada naiknya level tegangan pada bus sebelum dan setelah

lokasi bus PLTS *on grid*. Hal ini menjelaskan bahwa variasi sebaran PLTS *on grid* yang lebih banyak akan berdampak lebih luas pada naiknya profil tegangan sistem distribusi. Namun pertimbangan kelayakan teknis terhadap kapasitas (*sizing*) PLTS *on grid* harus mempertimbangkan kemungkinan dampak merugikan pada sistem distribusi yaitu dapat menyebabkan aliran daya balik pada sistem distribusi listrik [26]

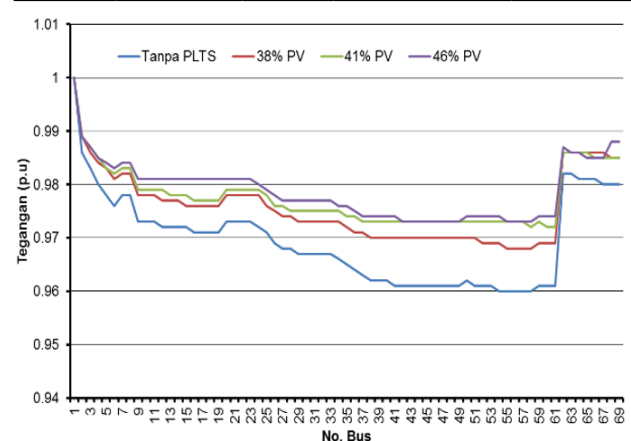
Hasil optimasi lokasi (*placement*) penyambungan

Tabel 1. Lokasi dan kapasitas PLTS *on grid*

No Bus	Kapasitas PLTS (MW)	$\sum$ PPV (MW)	% $\sum$ PPV Terhadap $\sum$ Beban	Rugi-rugi daya (MW)
39	0,194	1,156	38%	0,029
45	0,164			
50	0,175			
64	0,141			
65	0,166			
66	0,136			
69	0,180			
34	0,193	1,243	41%	0,023
45	0,169			
49	0,160			
54	0,196			
56	0,169			
62	0,183			
68	0,173			
15	0,129	1,385	46%	0,022
18	0,126			
19	0,146			
22	0,132			
32	0,115			
34	0,116			
39	0,102			
44	0,107			
51	0,150			
54	0,121			
59	0,141			



Gambar 6. Grafik proses iterasi pada algoritma genetika, (a) simulasi-1, (b) Simulasi-2, (c) Simulasi-3



Gambar 7. Perbandingan profil tegangan bus sebelum dan setelah optimasi algoritma genetika

pembangkit listrik tenaga surya yang diperoleh harus mempertimbangkan dampak dari PLTS *on grid* tidak melebihi kapasitas termal dan kapasitas hubung singkat pada sistem distribusi radial.

Performansi optimasi algoritma genetika yang digunakan pada penelitian ini dapat dibandingkan dengan penelitian lainnya yang berhubungan dengan kasus pencarian optimal pembangkit tersebar (*Distributed Generations-DG*). Optimasi algoritma genetika oleh Moradi M [22] menghasilkan 3 lokasi injeksi DG pada kasus sistem distribusi *IEEE* 69 Bus (Bus 21: 0,9297 MW, Bus 62: 1,0752 MW, dan Bus 64: 0,9848 MW). Optimasi algoritma genetika oleh Essallah S [20], pada kasus *IEEE* 33 Bus menghasilkan lokasi penempatan optimum pada Bus 14 (1,529 MVA); Bus 19 (1,949 MVA); Bus 25 (1,533 MVA); Bus 29 (2,076 MVA);, dan Bus 30 (1,984 MVA).

V. KESIMPULAN

Metode optimasi algoritma genetika multi konstrain yang digunakan pada penelitian ini bertujuan untuk memberikan solusi penempatan lokasi dan kapasitas daya PLTS *on grid* yang sesuai dengan kondisi awal pada sistem distribusi. Sistem distribusi yang diuji yaitu penyulang 69 bus konfigurasi radial. Simulasi optimasi algoritma genetika yang diterapkan berdasarkan tiga batasan (konstrain) yaitu konstrain tegangan, konstrain kapasitas PLTS, dan konstrain total kapasitas PLTS. Simulasi optimasi dilakukan sebanyak tiga kali dengan mempertimbangkan variasi lokasi dan kapasitas daya PLTS. Simulasi-1 menemukan 7 lokasi pada *grid* dengan total kapasitas daya aktif 1,156 MW (38%), simulasi-2 menemukan 7 lokasi *grid* dengan total kapasitas 1,243 MW (41%), dan simulasi-3 menemukan 11 lokasi *grid* dengan total kapasitas 1,385 MW (46%). Hasil yang optimal merupakan Fitness Terbaik atau rugi-rugi daya terendah. Metode optimasi yang digunakan menghasilkan penurunan total rugi-rugi daya aktif dari kondisi awal sebesar 2,4% menjadi 1,08% pada optimasi simulasi-3. Nilai tegangan bus menjadi lebih baik atau meningkat dari kondisi awal tegangan terendah pada bus mencapai 0,960 p.u kemudian naik menjadi 0,973 p.u pada optimasi simulasi-3. Variasi lokasi dan kapasitas daya aktif (Watt) pada PLTS berdampak pada naiknya level tegangan pada bus sebelum dan setelah lokasi *grid* PLTS.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan Terima kasih diberikan kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia sebagai pemberi dana hibah sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik (hibah penelitian dosen pemula).

REFERENSI

[1] Permen ESDM No. 49 Tahun 2018, "Penggunaan Sistem PLTS Surya Atap oleh Konsumen PT. PLN (Persero)," 2018.

[2] B. Sivaneasan, M. L. Lim, and K. P. Goh, "Overcoming Solar PV Intermittency using Demand Response Management in Buildings," in *Energy Procedia*, vol. 143, pp. 210–215, 2017.

[3] F. Katiraei and J. R. Agüero, "Solar PV integration challenges," *IEEE Power Energy Mag.*, 2011.

[4] J. R. Agüero, S. Member, and S. J. Steffel, "Integration Challenges of Photovoltaic Distributed Generation on Power Distribution Systems," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–6, 2011.

[5] P. Chongfuangprinya, J. Spare, J. R. Agüero, J. H. R. Enslin, and H. Al-Atrash, "Integration of micro-scale Photovoltaic Distributed Generation on power distribution systems: Steady-state analyses," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T D), 2012 IEEE PES*, pp. 1–6, 2012.

[6] F. Katiraei and J. R. Agüero, "Solar PV Integration Challenges," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 9, no. 3, pp. 62–71, 2011.

[7] M. R. Islam, F. Rahman, and W. Xu, *Green Energy and Technology Advances in Solar Photovoltaic Power Plants*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.

[8] S. Teleke, F. Jahanbakhsh, F. Katiraei, J. R. Agüero, and S. Member, "Analysis of Interconnection of Photovoltaic Distributed Generation," in *Industry Applications Society Annual Meeting*, 2011, pp. 1–6.

[9] PT. PLN (Persero), "Pedoman penyambungan pembangkit listrik energi terbarukan ke sistem distribusi PLN," 2014, no. 0357.K/DIR/2014.

[10] M. Bhattacharya and D. Das, "Multi-objective placement and sizing of DGs in distribution network using genetic algorithm," in *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*, pp. 1–6, 2016.

[11] R. Shivarudraswamy, D. N. N. Gaonkar, Jayalakshmi N.S., and N. S. Jayalakshmi, "GA based optimal location and size of the distributed generators in distribution system for different load conditions," *1st IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2016*, pp. 2–5, Jul. 2017.

[12] M. A. S. Masoum, M. Ladjevardi, A. Jafarian, and E. F. Fuchs, "Optimal Placement, Replacement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks by Genetic Algorithms," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 4, pp. 1794–1801, Oct. 2004.

[13] D. K. Tabarok *et al.*, "Optimizing the Placement of Distributed Generation (DG) and Capacitor in Distribution Radial System With Genetic Algorithm (GA) Method (Case Study At Watu Ulo feeder Jember)," *Berk. SAINSTEK*, vol. 1, no. 1, pp. 35–40, 2017.

[14] B. Yang, W. Li, Y. Zhao, and X. He, "Design and analysis of a grid-connected photovoltaic power system," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2010.

[15] W. Yi-bo, W. Chun-sheng, L. Hua, and X. Hong-hua, "Steady-State Model and Power Flow Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Power System," in *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008, no. 6.

[16] Y. B. Wang, C. S. Wu, H. Liao, and H. H. Xu, "Steady-state model and power flow analysis of grid-connected photovoltaic power system," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008.

[17] Q. Alsafasfeh *et al.*, "Solar PV Grid Power Flow Analysis," *Sustainability*, vol. 11, no. 6, p. 1744, Mar. 2019.

[18] T. Gönen, "Electric power distribution engineering," in *Electric power distribution engineering*, 2014.

[19] H. Musa, L. A. Yusuf, and S. S. Adamu, "Power Flow Studies for Radial Distribution Systems With Distributed Generation," *J. Res. Innov. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 20–30, 2016.

[20] S. Essallah, A. Bouallegue, and A. Khedher, "Optimal Sizing and Placement of DG Units in Radial Distribution System," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 8, no. 1, 2018.

- [21] T. Shukla, S. Singh, and K. Naik, "Allocation of optimal distributed generation using GA for minimum system losses in radial distribution networks," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 94–106, 2010.
- [22] M. H. H. Moradi and M. Abedini, "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal distributed generation location and sizing in distribution systems," *Int. J. Green Energy*, vol. 9, no. 7, pp. 641–660, 2012.
- [23] I. Ziari, G. Ledwich, A. Ghosh, D. Cornforth, and M. Wishart, "Optimal allocation and sizing of DGs in distribution networks," in *IEEE PES General Meeting, PES 2010*, 2010.
- [24] A. Rajendran and K. Narayanan, "Optimal Installation of Different DG Types in Radial Distribution System Considering Load Growth," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 45, no. 7, pp. 739–751, Apr. 2017.
- [25] S. A. Taher, M. Hasani, and A. Karimian, "A novel method for optimal capacitor placement and sizing in distribution systems with nonlinear loads and DG using GA," *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2011.
- [26] R. A. Shayani and M. A. G. De Oliveira, "Photovoltaic generation penetration limits in radial distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 03, pp. 1625–1631, 2011.

Perintah Kontrol Gerak Kursi Roda Elektrik Menggunakan Sensor Elektromiograf

Arizal Mujibtamala Nanda Imron, Wahyu Muldayani, dan Sumardi
Universitas Jember
Jl. Kalimantan No.37 Kec. Sumbersari, Jember 6812
e-mail: arizal.tamala@unej.ac.id

Abstrak—Kelumpuhan merupakan suatu penyakit yang dapat membatasi mobilitas penderitanya. Salah satu solusi yang dapat membantu penderita kelumpuhan dalam melakukan mobilitasnya yaitu penggunaan kursi roda elektrik. Pada penelitian ini, kursi roda elektrik dengan spesifikasi dimana kontrol gerak kursi roda menggunakan otot pada kedua lengan, sehingga kursi roda elektrik ini sangat cocok digunakan bagi pasien kelumpuhan pada kaki dan lemahnya kekuatan tangan dalam memutar roda dari kursi roda. *Input* perintah kontrol gerak dilakukan melalui sensor elektromiograf yang terpasang pada otot fleksor dikedua lengan pasien. Output dari masing masing sensor tersebut diberikan *threshold* sebesar 2 volt untuk membedakan perintah kontrol atau bukan. Ketika output sensor lebih dari sama dengan *threshold* maka dianggap logika satu dan yang lain dianggap logika nol. Metode yang dilakukan untuk mengartikan output tersebut sebagai perintah kontrol dengan cara deteksi impuls. Gerakan kursi roda elektrik yang dapat dilakukan yaitu maju, belok kanan, dan belok kiri.

Kata kunci: *kursi roda elektrik, elektromiograf*

Abstract— Paralysis is a disease that can limit the mobility of the sufferer. One solution that can help people with paralysis in carrying out their mobility is the use of an electric wheelchair. In this study, an electric wheelchair with specifications where the wheelchair motion control uses muscles on both arms, so that the electric wheelchair is very suitable for patients with paralysis in the legs and weak hand strength in turning the wheels from the wheelchair. The input of motion control commands is carried out through an electromyograph sensor mounted on the flexor muscle in both patients' arms. The output of each sensor is given a threshold of 2 volts to distinguish control commands or not. When the sensor output is more than the same as the threshold, it is considered logic one and the other is considered logic zero. The method is used to interpret the output as a control command by impulse detection. The electric wheelchair movement that can be done is forward, turn right, and turn left.

Keywords: *electric wheelchair, electromyograph*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Kelumpuhan merupakan suatu penyakit yang dapat membatasi mobilitas penderitanya, banyak hal yang dapat dilakukan untuk membantu penderita dalam melakukan aktifitasnya mulai dari memberikan alat bantu jalan seperti tongkat hingga kursi roda. Kemajuan teknologi memungkinkan pembuatan kursi roda elektrik yang lebih memudahkan para penderita kelumpuhan dalam mengoperasikannya, berbagai macam tipe kursi roda elektrik yang sedang diteliti dan dikembangkan, tujuannya adalah untuk membantu penderita kelumpuhan dalam melakukan aktifitas kesehariannya. Pada penelitian yang menggunakan sinyal elektromiograf (EMG) sebagai kontrol kusi roda terdapat dua arah, yang pertama bersifat power assist [1], dan yang kedua bersifat kontrol penuh untuk kursi roda elektrik [2], kedua penelitian tersebut berbeda kegunaannya, kursi roda elektrik yang bersifat power assist lebih diperuntukkan bagi penderta

kelumpuhan dengan kekuatan tangan yang masih normal, sedangkan kursi roda yang bersifat kontrol penuh lebih diperuntukkan bagi penderita kelumpuhan dengan kekuatan tangan yang tidak lagi mampu memutar roda dari kursi roda elektrik.

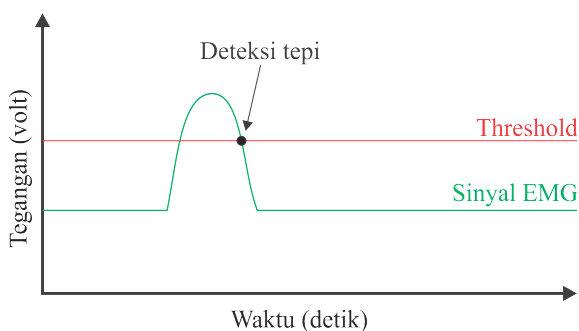
Penelitian yang bersifat kontrol penuh yang telah dilakukan adalah dengan memanfaatkan sensor elektromiograf yang diletakkan pada 4 titik otot pada lengan baik kiri maupun kanan, masing masing pergerakan dari otot tersebut merupakan satu perintah kontrol bagi kursi roda elektrik, semakin banyaknya sensor yang digunakan, efektifitas pemberian perintah kontrol akan berkurang ketika lebih dari satu otot yang bekerja, sehingga dibutuhkan pelatihan khusus ketika akan menggunakan kursi roda tersebut.

Peneliti lain berkaitan dengan EMG sebagai kontrol kursi roda elektrik mengemukakan sebuah metode baru yang dapat memetakan joystick, input sinyal EMG yang digunakan berasal dari 2 titik, yaitu leher kanan kiri dan

lengan. Sensor EMG yang terletak pada leher digunakan untuk mengendalikan arah kursi roda elektrik sedangkan sensor pada lengan digunakan untuk mengendalikan kecepatan [3]. Penelitian tersebut memungkinkan untuk melakukan 2 input dalam waktu yang bersamaan. Selain kedua penelitian tersebut terdapat juga penelitian yang menggunakan otot trapezium kiri dan kanan untuk menggerakkan kursi roda elektrik [4], [5], sehingga perintah kontrolnya dapat diberikan dengan menggerakkan leher sehingga terjadi perubahan keregangan pada otot trapezium kanan dan kiri. Terdapat juga penelitian lain yang menggunakan otot zygomaticus yang terletak pada bagian kanan dan kiri wajah manusia sebagai input perintah gerak kursi roda elektrik [6], [7]. Perintah kontrol gerak kursi roda juga dapat diberikan secara kombinasi dengan memanfaatkan 3 jenis otot pada manusia, diantaranya otot bisep, ulna, dan flexor. Ketiga otot tersebut dipadukan untuk menggerakkan kursi roda elektrik [8]. Klasifikasi sinyal EMG untuk perintah gerak kursi roda elektrik juga dapat dilakukan melalui sensor myo-armband, dengan gerakan tangan mengepal, pergelangan tangan diarahkan ke kanan dan ke kiri, tangan lurus dan tangan dalam keadaan santai [9] dan terdapat juga penelitian yang menggunakan otot lengan bawah sebagai input sistem kursi roda elektrik [10]. Penelitian-penelitian tersebut menjadi dasar pada penelitian ini dengan mengurangi titik sensor EMG yang digunakan sehingga dapat mempermudah atau meningkatkan efektifitas saat memberikan perintah kontrol pada kursi roda elektrik. Konfigurasi perintah kontrol hanya memanfaatkan otot fleksor, otot fleksor adalah otot yang bekerja ketika tangan melakukan gerakan menggenggam.

II. METODE

Desain perintah kontrol yang digunakan didasarkan pada perubahan ketegangan otot yang terjadi pada otot fleksor. Dengan bantuan sensor EMG yang diletakkan pada otot fleksor di lengan kiri dan kanan, perubahan ketegangan otot tersebut dapat dideteksi. Pembacaan hasil sinyal EMG dilakukan dengan bantuan ADC pada arduino, selanjutnya proses yang dilakukan adalah proses threshold [11], yaitu proses pemberian batas untuk meubah sinyal EMG menjadi perintah kontrol yang dapat diartikan oleh arduino, proses thresholding ditunjukkan seperti Gambar



Gambar 1. Proses threshold sinyal EMG

Tabel 1. Perintah kontrol gerak kursi roda elektrik

No	Perintah kontrol	berjalan		Berhenti	
		Trigger lengan kanan	Trigger lengan kiri	Trigger lengan kanan	Trigger lengan kiri
1	Maju	√	√	√	√
2	Belok kanan		√	√	
3	Belok kiri	√			√

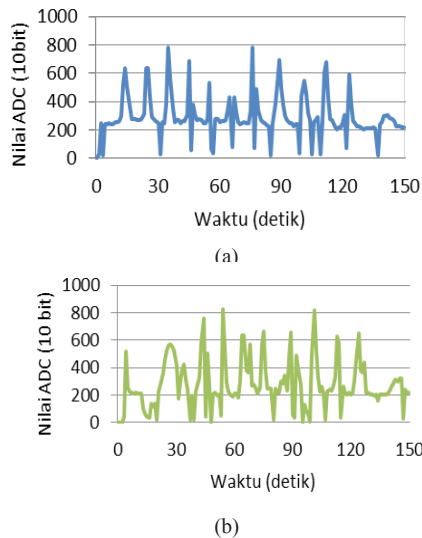
1. Ketika output EMG lebih dari sama dengan ambang batas yang diberikan maka berarti logika 1, sedangkan jika dibawahnya maka berarti logika 0. Perintah kontrol akan bekerja ketika terjadi perubahan dari logika 1 ke logika 0, atau disebut juga deteksi tepi.

Perintah kontrol diterjemahkan sesuai dengan impuls yang terjadi antara sensor EMG pada tangan kanan dan kiri, penerjemahan perintah kontrol kursi roda elektrik tercermin dalam Tabel 1. Perintah kontrol terbagi atas tiga gerakan kursi roda elektrik, yang pertama gerakan maju, gerakan belok kanan dan belok kiri, trigger pada Tabel 1 adalah perubahan ketegangan otot yang awalnya merenggang atau dalam keadaan santai kemudian diberi trigger dengan cara menggenggam yang membuat otot fleksor menjadi tegang dan dilepaskan kembali untuk membuat otot fleksor kembali renggang, trigger tersebut dilakukan secara cepat.

Perintah kontrol maju dilakukan dengan cara dilakukan satu kali trigger secara bersama antara lengan kiri dan kanan, kemudian sistem akan menterjemahkan hal tersebut sebagai perintah untuk kursi roda bergerak maju, sedangkan untuk memberikan perintah berhenti dilakukan trigger sebanyak satu kali secara bersama antara kedua tangan. Perintah kontrol belok kanan dilakukan dengan cara memberi trigger pada lengan kiri sebanyak satu kali dan kursi roda elektrik akan melakukan gerakan belok kanan, dan untuk memberi perintah berhenti maka diberikan trigger sebanyak satu kali pada lengan kanan. Begitu juga dengan perintah untuk belok kiri dengan memberikan trigger satu kali pada lengan kanan dan untuk berhentinya dilakukan trigger satu kali pada lengan kiri, sehingga untuk pemberian perintah berhenti dari kondisi maju, belok kanan dan belok kiri adalah dengan trigger yang berbeda-beda seperti yang terdapat pada Tabel 1.

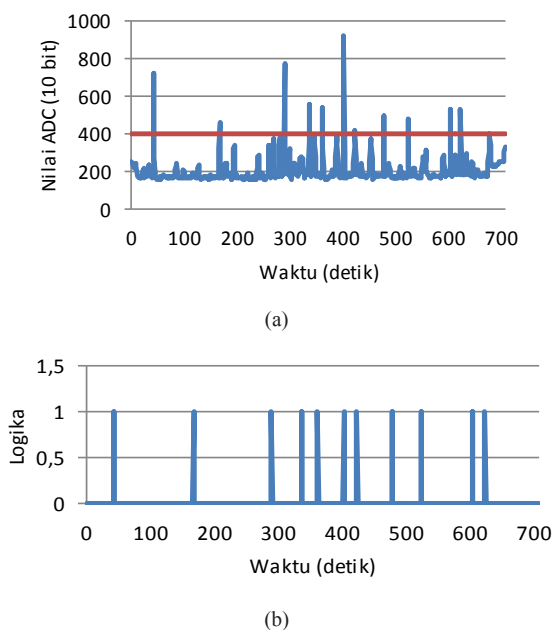
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Percobaan pertama dilakukan untuk mengetahui respon sensor EMG terhadap kontraksi otot fleksor. Dilakukan sebanyak 10 kali percobaan untuk melihat efektifitas metode threshold untuk mendeteksi perintah kontrol yang diberikan. Pada Gambar 2, 3, dan 4 digambarkan salah satu hasil percobaan yang dilakukan. Percobaan dilakukan mulai dengan melihat nilai keluaran dari sensor EMG ketika terjadi kontraksi otot dan ketika otot dalam keadaan santai. Output sensor EMG berupa tegangan berkisar antara 0 volt hingga 5 volt yang dapat langsung dibaca oleh analog to digital converter (ADC)

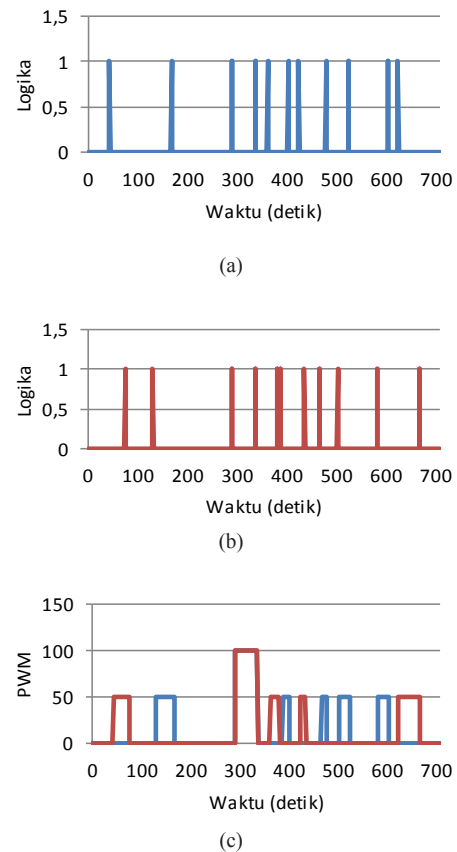


Gambar 2. Output sensor EMG (a) lengan kanan, (b) lengan kiri

Perekaman sinyal EMG menggunakan ADC 10 bit, sehingga memiliki rentan nilai antara 0 hingga 1023, perekaman sinyal EMG pada Gambar 2 menunjukkan perbedaan output ketika otot berkontraksi dan tidak, ketika otot tidak berkontraksi nilai ADC yang terekam berkisar sekitar 200, sedangkan ketika otot berkontraksi maka nilainya naik melebihi 400, sehingga dari percobaan tersebut dapat diambil threshold sebesar 400. Gambar 3 menunjukkan proses pemberian threshold dan diterjemahkan sebagai logika 1 dan 0 untuk identifikasi perintah gerak kursi roda elektrik. Gambar 3a menunjukkan output sinyal EMG yang didapat dari tangan kanan dengan gerakan tangan menggenggam setelah itu dilepaskan genggamnya dan dilakukan berulang, terlihat bahwa ketika tangan menggenggam nilai ADC yang



Gambar 3. Output sensor EMG pada tangan kanan, (a) dengan threshold 2 volt, (b) logika hasil threshold

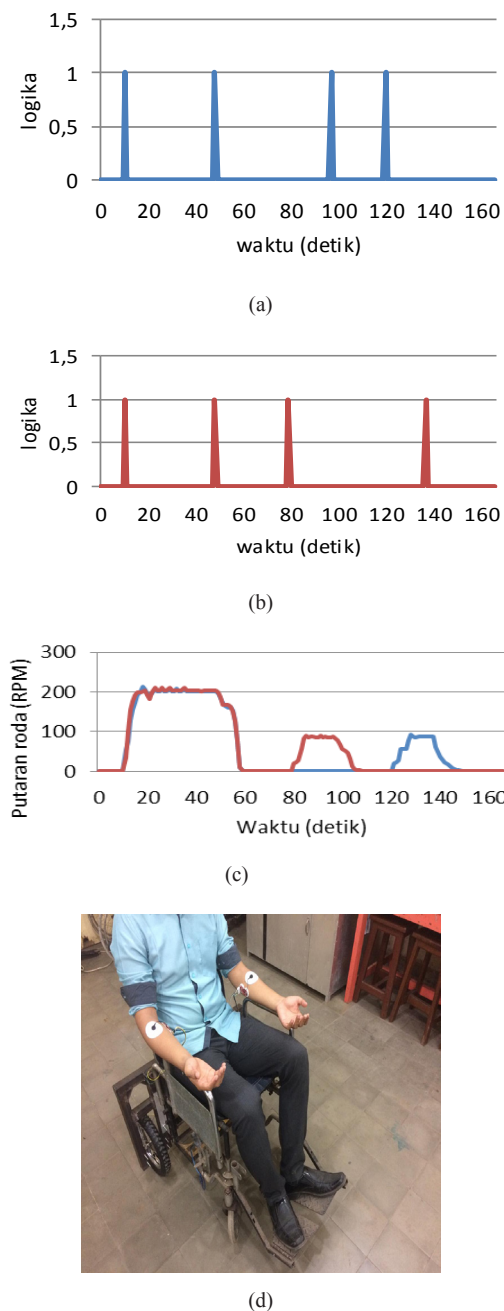


Gambar 4. Inisialisasi perintah kontrol gerak kursi roda elektrik (a) logika perintah kontrol dari lengan kanan, (b) logika perintah kontrol dari lengan kiri, (c) output pwm untuk motor kanan dan kiri

terbaca melebihi 400, sehingga pada Gambar 3b terjadi perubahan logika.

Tahap selanjutnya adalah pengujian perintah kontrol gerak kursi roda elektrik dengan identifikasi kontraksi otot seperti pada Tabel 1. Gambar 4a dan 4b menunjukkan perubahan logika dari output EMG, grafik berwarna biru menunjukkan logika dari tangan kanan dan grafik warna merah menunjukkan perubahan logika dari tangan kiri, sedangkan grafik pada Gambar 4c menunjukkan penterjemahan perintah kontrol yang diberikan pada Gambar 4a dan 4b sebagai Pulse Width Modulation (PWM), pwm tersebut sebagai input motor DC untuk menggerakkan roda kanan dan kiri, dengan ketentuan untuk gerak maju diberikan pwm sebesar 100 pada motor kanan dan kiri, untuk belok kanan diberikan pwm 50 pada motor kiri dan 0 pada motor kanan dan untuk belok kiri kebalikan dari inisialisasi pwm untuk belok kanan, pada gambar 4c grafik biru untuk pwm motor kanan dan merah untuk pwm motor kiri.

Tahap terakhir adalah pengujian secara langsung, yaitu kursi roda dijalankan dengan input perintah kontrol geraknya menggunakan sinyal EMG yang dibaca dari otot fleksor pada lengan kiri dan kanan. Pengujian dilakukan dengan sederhana yaitu pemberian perintah dasar seperti perintah maju, belok kanan, dan belok kiri yang dilakukan masing-masing sebanyak 1 kali. Gambar 5a menunjukkan logika perintah kontrol yang diberikan



Gambar 5. Realisasi perintah kontrol gerak kursi roda elektrik (a) inisialisasi logika lengan kanan, (b) inisialisasi logika lengan kiri, (c) kecepatan kusi roda elektrik, (d) foto saat pengujian

oleh lengan kanan sedangkan Gambar 5b merupakan logika perintah kontrol yang diberikan oleh lengan kiri. Perintah pertama yang diberikan adalah perintah maju. Perintah maju ditunjukkan pada detik ke 10 dimana dari kedua lengan memiliki logika 1 dan dilakukan secara trigger, sedangkan pada saat berhenti dilakukan hal yang sama, yang terjadi pada detik ke 50. Selanjutnya perintah belok kanan yaitu dengan memberikan logika trigger pada lengan kiri yang ditunjukkan pada Gambar 5b detik ke 80 dan perintah berhenti berbelok kanan dilakukan dengan cara memberi logika trigger pada lengan kanan yang ditunjukkan pada detik ke 100 di Gambar 5a. Perintah gerak terakhir yang dilakukan pengujian adalah perintah

gerak belok kiri, perintah belok kiri dilakukan dengan cara memberikan logika trigger pada lengan kanan seperti pada detik ke 120 di Gambar 5a. Dan untuk berhenti berbelok kiri, maka harus diberikan logika trigger pada lengan kiri yang ditunjukkan pada detik ke 140 di Gambar 5b. Pada Gambar 5c menunjukkan gerak kursi roda elektrik yang dibaca melalui pergerakan roda dengan satuan rotasi per menit (rpm). Saat perintah maju berlangsung kursi roda berjalan dengan kecepatan 200 rpm, sedangkan untuk berbelok, baik berbelok kanan maupun berbelok ke kiri, kecepatan kursi roda rata-rata sebesar 90 rpm. Pergerakan kursi roda belum stabil karena belum ada umpan balik untuk kontrol kecepatannya, sehingga terdapat sedikit perubahan ketika stady state dan Gambar 5d menunjukkan foto saat melakukan pengujian.

IV. KESIMPULAN

Perintah gerak kursi roda dapat dilakukan menggunakan sinyal EMG yang diletakkan pada otot fleksor di lengan kanan dan kiri. Theshold yang diberikan pada sinyal EMG dapat menterjemahkan perintah gerak kursi roda elektrik yang diberikan ketika terjadi kontraksi pada otot fleksor. Belum adanya kontrol kecepatan pada penelitian ini mengakibatkan tidak stabilnya pergerakan kusi roda elektrik. Penelitian selanjutnya akan ditambahkan kontrol kecepatan untuk menstabilkan pergerakan kursi roda elektrik dan akan dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai tingkat kelelahan pada otot fleksor.

REFERENSI

- [1] Choi, et.al, "A New, Human-Centered Wheelchair System Controlled By The EMG Signal", Prosiding Seminar International Joint on Neural Network, pp. 4664-4671, Vancouver, Juli 2006.
- [2] Hardiansyah, et.al, "The Electric Wheelchair Control Using Electromyography Sensor Of Arm Muscle", International Conference on Information & Communication Technology and Systems (ICTS), 2016
- [3] H. Kawamoto, Suwoong Lee, S. Kanbe and Y. Sankai, "Power assist method for HAL-3 using EMG-based feedback controller," SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme - System Security and Assurance (Cat. No.03CH37483), Washington, DC, 2003, pp. 1648-1653 vol.2.
- [4] C.Ishii, R. Konishi, "A Control of Electric Wheelchair Using an EMG Based on Degree of Muscular Activity", Euromicro Conference on Digital System Design, 2016.
- [5] S.Sathish et.al, "Control of Robotic Wheel Chair using EMG Signals for Paralysed Persons", Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(1), DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i1/85726, 2016.
- [6] G.Jang et.al, "EMG-based Continuous Control Method for Electric Wheelchair", International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014.
- [7] G.Jang et.al, "EMG-Based Continuous Control Scheme with Simple Classifier for Electric-Powered Wheelchair", IEEE Transactions On Industrial Electronics, 2015.
- [8] F.H. Tyastuti et.al, "Classification of EMG Signal on Arm Muscle Motion Using Special Fourier Transformation to

- Control Electric Wheelchair”, International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation, 2017.
- [9] Falihi, Adi Dwi Irwan, et.al, “Classification of EMG Signals from forearm Muscles As Automatic Control Using Naive Bayes”, International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, 2017.
- [10] Mahendran, Rampriya, “EMG Signal based Control of an Intelligent Wheelchair”, International Conference on Communication and Signal Processing, India, 2014.
- [11] Imron, AMN. Realisasi Kontrol Hirarki Untuk Pengaturan Kecepatan Kursi Roda Elektrik Berdasarkan Subject Intension Menggunakan Bioelectrical Impedance,” Prosiding SENIATI, 2016.

Identifikasi Tingkat Kematangan Kelapa Sawit Berbasis Pencitraan Termal

Khusnul Azima, Khairul Munadi, Fitri Arnia, dan Maulisa Oktiana
Jurusan Teknik Elektro dan Komputer, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdul Rauf No. 7, Banda Aceh 23111
e-mail: khusnulazima@gmail.com

Abstrak—Indonesia merupakan produsen terbesar minyak kelapa sawit (*Elaeis guineensis jacq*). Kelapa sawit merupakan komoditi utama dan memiliki nilai ekonomi yang tinggi. Kelapa sawit harus dijaga dari segi kualitas sehingga menghasilkan kadar minyak yang optimal dan berkualitas. Sebelumnya penentuan karakteristik kelapa sawit dilakukan secara manual dan pengolahan citra tampak, akan tetapi metode tersebut memiliki kekurangan karena ketergantungan dari individual penyortir dan faktor pencahayaan. Penelitian ini akan memperbarui metode sebelumnya dengan menghasilkan metode indentifikasi tingkat kematangan kelapa sawit berbasis pencitraan termal. Citra termal tidak bergantung pada pencahayaan karena tingkat kematangan ditentukan oleh suhu yang direpresentasikan dengan warna. Metode pendeteksian pada penelitian ini menggunakan fitur berbasis warna yaitu Deskriptor Warna Dominan (DWD) dan *Color Moment*. Hasil dari fitur DWD dan *Color Moment* tersebut menjadi input proses klasifikasi menggunakan metode K-Nearest Neighbor (KNN). Hasil pengimplementasian pencitraan termal untuk mendeteksi tingkat kematangan buah kelapa sawit menunjukkan kinerja pengenalan yang baik yaitu dengan persentase tingkat pengenalan sebesar 89% dan identifikasi tingkat kematangan kelapa sawit menggunakan pencitraan termal lebih efisien karena dikerjakan tanpa campur tangan manusia dan tidak tergantung kepada bantuan pencahayaan.

Kata kunci: minyak kelapa sawit, kematangan, DWD, *Color Moment*, KNN

Abstract—Indonesia is the biggest producer of palm oil (*Elaeis guineensis jacq*). The palm tree is a primary commodity that posses a high economic value. Palm oil must be considered in terms of quality to produce optimal and high-quality oil. Previously, the stipulation of the palm tree characterization used manual and visual image utilization method; it may have weaknesses due to the dependency of individual sorting and coruscation factor. Therefore, this research is aimed to improve the performance of the previous method in identifying the ripeness of palm tree based on thermal imaging. The excess of thermal imaging was not related to the coruscation since the level of ripeness was both determined by the temperature and colour. The detection method of this research deployed the colour-based features that are Dominant Colour Descriptor and Color Moment. The DCD and Color Moment was the input to the K-Nearest Neighbor (KNN) method. The percentage of identification rate was 89%, and the identification of oil palm maturity level using thermal imaging is more efficient because it is done without human intervention and does not depend on lighting assistance compared to manual method and method of using RGB visual images.

Keywords: palm oil, Ripeness, DWD, *Color Moment*, KNN

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis jacq*) merupakan tanaman monokotil yang menjadi unggulan utama produk komoditi Indonesia [1]. Indonesia sebagai pengekspor *Crude Palm Oil* (CPO) terbesar di dunia, selalu menjaga dan mengikuti standar buah kelapa sawit internasional sehingga hasil CPO Indonesia banyak dicari oleh industri pangan dan non-pangan internasional. Agar mampu bersaing di pasar domestik dan pasar global, petani, dan pabrik kelapa sawit (PKS) harus memperhatikan beberapa aspek, baik aspek pemeliharaan, teknik budidaya maupun penanganan pasca panen.

Proses penentuan tingkat kematangan buah kelapa sawit dapat dilakukan dengan beberapa cara, yang

pertama dilakukan secara manual dan yang kedua dengan pemanfaatan pencitraan visual. Cara manual yaitu penyortiran buah kelapa sawit memakai tenaga manusia yang bersifat objektif. Proses sortir buah berdasarkan fisik berupa berat ukuran Tandan Buah Segar (TBS) dan warna buah. Sedangkan penentuan tingkat kematangan buah kelapa sawit dengan memanfaatkan pencitraan visual dilakukan dengan menganalisis model warna *Red Green* dan *Blue* (RGB) dari citra visual [1]. Akan tetapi kedua metode tersebut di atas memiliki beberapa keterbatasan, diantaranya yaitu cara manual membutuhkan tenaga ahli yang profesional yang banyak dalam menentukan tingkat kematangan kelapa sawit secara baik dan harus mempunyai sifat ketelitian yang tinggi [2]. Sedangkan cara visual memiliki ketergantungan terhadap sumber pencahayaan

sehingga apabila tidak ada sumber cahaya maka prosesnya tidak dapat dilakukan [3]. Salah satu cara untuk mengatasi kedua hal tersebut adalah dengan memanfaatkan pencitraan termal. Pencitraan termal adalah pencitraan yang memanfaatkan pancaran suhu dari suatu benda yang disebabkan oleh gerak acak partikelnya. Pengambilan pencitraan termal dapat dilakukan dengan menggunakan kamera termal. Kamera termal merupakan alat yang dapat mengukur ukuran suatu radiasi yang bergerak dan tidak bergerak tanpa bergantung pada pencahayaan. Setiap objek yang mengeluarkan energi panas dengan suhu 0°K dapat diketahui dengan kamera termal tanpa melakukan interaksi [1]. Pada penelitian sebelumnya, kualitas TBS dapat ditentukan dengan menganalisis citra visual dan tingkat kematangan Asam Lemak Bebas (ALB) pada kelapa sawit. Pencitraan visual digunakan untuk mengetahui perubahan warna dan dilanjutkan dengan proses pengujian biokimia, hasil analisis warna RGB dan biokimia menjadi dasar dalam membangun Jaringan Saraf Tiruan (JST) [1], [4]. Selain itu, terdapat beberapa algoritma yang digunakan untuk mengklasifikasikan ALB kelapa sawit, salah satunya dengan menggunakan algoritma logika *Fuzzy*. Hasil analisis warna RGB pada citra kelapa sawit akan menjadi input untuk membangun logika *fuzzy*, sehingga dapat diketahui tingkat kandungan ALB di dalam buah kelapa sawit [2], [5]. Selanjutnya, untuk menentukan proses mutu kelapa sawit (matang dan tidak matang) menggunakan pencitraan visual, dilakukan dengan menganalisis model warna *Hue*, *Saturation*, *Intensity* (HSI) dari citra visual. Hasil analisis warna HSI tersebut kemudian menjadi *input* untuk membangun JST untuk mengetahui tingkat kematangan kelapa sawit [6]. Penentuan kualitas kelapa sawit dengan proses pencitraan termal menggunakan kamera termal *prototipe* dan komersial untuk mengukur suhu TBS pada tiga tingkatan yang berbeda. Data suhu yang telah diukur menggunakan kamera kemudian diimpor ke *microsoft excel* untuk

dianalisis dengan *software SPSS* [7].

Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan citra termal dalam menentukan kualitas kelapa sawit berdasarkan kematangan buah dan mengembangkan metode baru dalam identifikasi dan klasifikasi kematangan kelapa sawit berdasarkan fitur DWD dan *Color Moment*.

II. STUDI PUSTAKA

A. Tingkat Kematangan dan Konsep Kualitas Kelapa Sawit

Tingkat kematangan buah merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kualitas dan menentukan hasil optimum dari sebuah TBS kelapa sawit. TBS yang matang maksimal mempunyai lebih banyak minyak dibandingkan dengan TBS yang belum matang. Pemanenan buah kelapa sawit memerlukan perlakuan khusus dalam menentukan kematangan buah sebagai bahan bakunya, apabila pemanenan buah tidak dilakukan secara objektif maka hasil kualitas CPO akan mempunyai kualitas yang buruk [1]. Tabel 1 dan Gambar 1 menampilkan ciri-ciri dan pengelompokan tingkat kematangan buah kelapa sawit secara konvensional. Sedangkan kategori tingkat kematangan kelapa sawit berdasarkan warna visual dan termal dijabarkan pada Tabel 2.

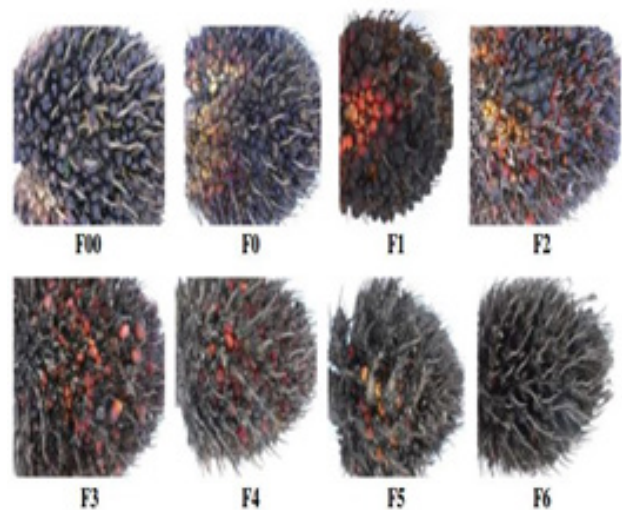
B. Citra Termal dan Radiasi

Citra termal Inframerah (IR) atau sering disebut juga sebagai termografi, merupakan suatu metode diagnosa yang didasarkan pada perbedaan temperatur antar jaringan dari tubuh manusia/energi panas dan merupakan salah satu teknik yang baik dalam visualisasi yang dapat digunakan dalam berbagai bidang pengetahuan. Kamera IR yang modern dapat mengambil atau merekam gambar secara kualitatif dan kuantitatif dari suatu objek sehingga menghasilkan gambar warna-warni dan mampu mengukur suhu permukaan benda [8].

Intensitas radiasi inframerah yang dapat direkam oleh

Tabel 1. Tingkat kematangan tandan kelapa sawit [3], [7]

Fraksi	% Jumlah Brondolan	Derajat Kematangan	Kategori	Suhu
00	Tidak ada, buah masih hitam	Sangat Mentah	Tidak Matang	26-30°K
0	Membrondol 1-12, 5 %	Mentah	Tidak Matang	
1	Membrondol 12-5,25 %	Kurang Matang	Matang	32-37°K
2	Membrondol 25-50 %	Matang I	Matang	
3	Membrondol 50-75 %	Matang II	Matang	
4	Buah dalam ikut membrondol	Lewat Matang I	Terlalu Matang	38-49°K
5	Buah dalam ikut membrondol	Lewat Matang II	Terlalu Matang	
6	Semua buah membrondol	Tandan Kosong	Terlalu Matang	



Gambar 1. Kondisi tingkat fraksi kematangan TBS kelapa sawit [3]

Tabel 2. Kematangan kelapa sawit berdasarkan warna visual dan termal

Kategori	Visual	Termal
Tidak matang	Warna merah muda yang tidak merata, khusus pada bagian ujung tandan buah kelapa sawit tidak terdapat warna merah.	Warna merah bercampur merah bata tua, komposisi banyak warna merah bata.
Matang	Warna merah telah merata, di bagian tengah terdapat warna ungu kecil dan warna merah pigmen lebih dominan di bagian depan dibandingkan pada bagian ujung tandan.	Warna dominan warna kuning campur putih, mendekati tandan terdapat warna kuning kemerahan.
Terlalu matang	Warna merah kirmizi telah sampai ke ujung tandan buah kelapa sawit.	Warna kuning terang terdapat dekat tandan, sedangkan warna putih di bagian tengah dan didominasi warna kuning

termografi kisaran (900-14,000 nanometer atau 0,9-14 μm), sedangkan untuk energi IR disebut juga sebagai semua benda yang memiliki temperatur dari (0°K atau 273.15°C) dan memiliki lebih besar suhu dari suhu mutlak yang akan memancarkan sejumlah panas [8].

Sinar IR dan sinar dalam spektrum adalah satu gelombang elektromagnetik dan merupakan radiasi termal. Semua benda yang mempunyai temperatur di atas nol dapat memancarkan energi panas ke sekitarnya dalam bentuk inframerah yang memancarkan perubahan metabolis dan fisiologis, sedangkan pada energi panasnya mempunyai energi ion positif dan negatif sehingga menghasilkan pergerakan partikel-partikel atom yang didalamnya dapat diubah menjadi radiasi elektromagnetik [8].

C. Aplikasi Pencitraan Termal

Penggunaan pencitraan termal dalam dua dekade terakhir mengalami kemajuan yang pesat, banyak disiplin ilmu yang mulai memakai atau menerapkan citra termal dalam kesehariannya. Beberapa disiplin ilmu yang telah menerapkan yaitu disiplin ilmu komputer, pemantauan kondisi, komponen listrik, pertanian, dan kesehatan.

Pemanfaatan pencitraan termal dalam berbagai bidang disiplin ilmu memudahkan seseorang dalam mendeteksi peristiwa, kejadian, informasi, dan visualisasi tanpa harus berinteraksi dengan objek tersebut. Khususnya, dalam mendeteksi kualitas kematangan buah kelapa sawit, sedangkan sistem yang menggunakan kamera digital untuk mendeteksi atau mengakuisisi citra tampak (*visible image*) mempunyai kekurangan dan kelemahan dari sistemnya yaitu ketergantungan pada pencahayaan (iluminasi).

Implementasi pencitraan termal menggunakan *region of interest* (ROI) sangatlah membantu dalam meningkatkan kandungan informasi karena menggunakan sistem pengkodean secara berbeda pada area tertentu sehingga menghasilkan kualitas yang lebih baik dari area sekitarnya [9].

D. Ekstraksi Fitur Citra Termal

Ekstraksi fitur adalah proses pengindeksan suatu database citra beserta isinya. Setiap ekstraksi fitur merupakan vektor ciri. Ekstraksi fitur dapat dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu *low-level* merupakan ekstraksi ciri berdasarkan isi visual, *middle-level* ekstraksi berdasarkan wilayah dan *high-level* ekstraksi berdasarkan informasi yang terkandung dalam citra.

Pada penelitian ini, fitur yang digunakan adalah Deskriptor Warna Dominan (DWD) dan *Color Moment*.

1. Deskriptor Warna Dominan

DWD menggambarkan distribusi informasi warna gambar yang menonjol pada citra. Deskriptor dapat menggantikan keseluruhan informasi warna pada citra dengan sejumlah kecil perwakilan warna [10], [11]. Proses ekstraksi DWD dilakukan seperti dijelaskan dalam [10], [11].

Hasil ekstraksi fitur DWD menghasilkan nilai C_{dom} dan C_{fin} , dimana C_{dom} merepresentasikan warna dominan pada gambar, sedangkan C_{fin} sebaran piksel persentase warna.

2. Color Moment

Color Moment adalah gambaran dari fitur warna dalam mengkarakterisasi warna gambar. *Color moment* melakukan distribusi warna dari sebuah gambar selalu dengan menggunakan distribusi probabilitas. Perhitungan *moment* digunakan untuk mendapatkan kesamaan warna sebuah gambar, dimana nilai dari kesamaan tersebut digunakan untuk membandingkan gambar data latih dan gambar data uji. Pada penelitian ini, digunakan dua *Color Moment* yaitu: *Mean* (μ), standar deviasi (σ) untuk mewakili distribusi warna dalam gambar [12].

Moment 1-Mean,

$$E_i = \sum_{j=1}^N \frac{1}{N} P_{ij}, \quad (1)$$

moment 2- Standar deviasi,

$$\sigma_i = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (P_{ij} - E_i)^2\right)}, \quad (2)$$

dengan N adalah total jumlah pada citra, P_{ij} merupakan nilai dari komponen warna ke- i pada piksel - j dan E_i adalah nilai rata-rata dalam citra ke- i .

Proses ekstraksi fitur pada *Color Moment* menghasilkan nilai Mean RGB dan StdRGB, dimana nilai MeanRGB menjelaskan dari nilai *Mean*, sedangkan nilai StdRGB disebut nilai standar deviasi.

E. K-Nearest Neighbor (KNN)

Algoritma *K-Nearest Neighbor* (KNN) merupakan sebuah metode untuk menentukan kategori berdasarkan data pembelajaran yang jaraknya paling dekat dengan

kategori tersebut. KNN merupakan algoritma *Supervised Learning*, dimana hasil dari *Query Instance* yang baru diklasifikasi berdasarkan mayoritas dari kategori pada KNN. Sedangkan tujuan dari KNN adalah mengklasifikasikan objek baru berdasarkan atribut dan data training [12]. Prinsip kerja KNN adalah mencari jarak terdekat antara data yang akan dievaluasi dengan k tetangga (*neighbor*) terdekatnya dalam data pelatihan. Data pelatihan diproyeksikan ke ruang berdimensi banyak, dimana masing-masing dimensi merepresentasikan fitur dari data.

Langkah-langkah untuk menghitung metode KNN antara lain [13]:

1. Menentukan kategori berdasarkan mayoritas kategori pada k-tetangga;
2. Menghitung jarak antara setiap data yang akan dievaluasi dengan data uji;
3. Mengurutkan jarak yang terbentuk;
4. Menentukan jarak terdekat sampai urutan k;
5. Memasangkan kelas berdasarkan mayoritas kategori. Menentukan jumlah kelas dari tetangga yang terdekat dan tetapkan kelas tersebut sebagai kelas data yang akan dievaluasi,

$$d_i = \sqrt{\sum_{i=1}^p (x_{2i} - x_{1i})^2}, \quad (3)$$

dengan p merepresentasikan dimensi data, x_{1i} merupakan sampel data, dan x_{2i} adalah data uji.

F. Parameter Tingkat Pengenalan

Tingkat pengenalan adalah proses memberi informasi tentang tingkat pengenalan dan skalabilitas dari suatu sistem. Pengenalan dapat dikenalkan dengan membagi data pelatihan besar menjadi data yang lebih kecil. Cara membagi data melalui pengelompokan dan klasifikasi pada sub-model untuk setiap perpecahan.

$$\text{Tingkat Pengenalan} = \frac{\text{Jumlah citra teridentifikasi}}{\text{Jumlah total citra uji}} \times 100\%. \quad (4)$$

III. METODE

Kinerja sistem pencitraan termal kelapa sawit diidentifikasi berdasarkan hasil DWD dan *Color Moment* dan selanjutnya metode KNN digunakan sebagai teknik pengklasifikasian.

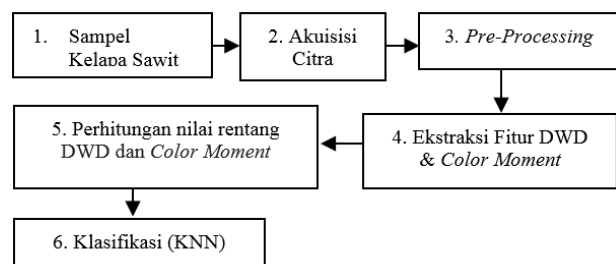
A. Bahan dan Kondisi Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan basis data citra kelapa sawit yang diperoleh dari pengolahan pabrik kelapa sawit (PKS). Basis data tersebut terdiri dari tiga kategori, yaitu kategori tidak matang, matang, dan terlalu matang. Dimana ketiga jenis kategori tersebut dikategorikan oleh petugas atau para ahli penyortiran pada pabrik kelapa sawit menggunakan buku pedoman penelitian standar nasional mutu kelapa sawit.

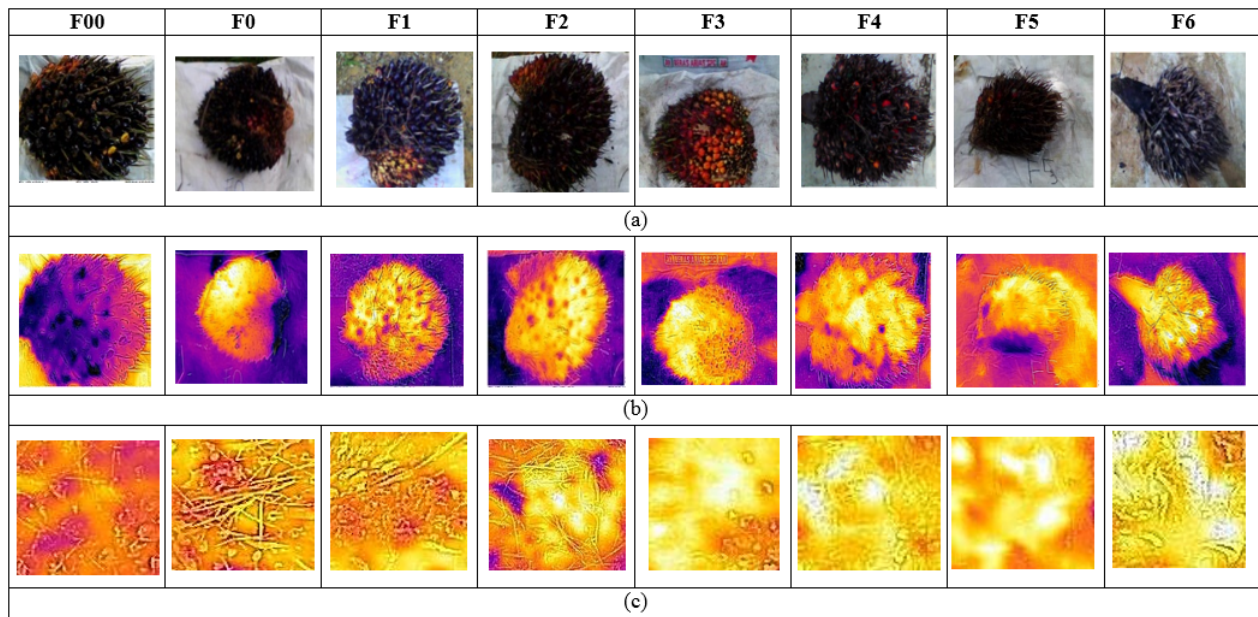
B. Alur Simulasi

Gambar 2 menunjukkan alur simulasi penelitian. Setiap blok dijelaskan sebagai berikut.

1. Sampel yang digunakan berupa citra termal kelapa sawit yang berjumlah 120 sampel yang terdiri dari citra tidak matang berjumlah 40, citra matang 40, dan citra terlalu matang 40;
2. Akuisisi citra: merupakan proses pengambilan citra digital kelapa sawit memakai kamera termal FLIR C2 dimana objek kelapa sawit yang akan diambil citranya ditempatkan di atas karung dan selanjutnya diakuisisi;
3. Pre-processing; setelah data citra diakuisisi maka tahap selanjutnya melakukan pemisahan citra visual dan citra termal menggunakan aplikasi *FLIR Tools*; selanjutnya adalah proses analisis ROI pada bagian tengah citra termal (inti dari buah kelapa sawit) memakai aplikasi matlab;
4. Perhitungan DWD dan *Color Moment*; setelah hasil *cropping* ROI didapatkan, proses selanjutnya adalah ekstraksi fitur, dengan kriteria sebagai berikut:
 - Fitur DWD: Pertama dilakukan konversi citra dari ruang warna RGB ke ruang warna HSV, kemudian dilakukan proses kuantisasi warna HSV dimana terdiri dari sembilan level H, tiga level S, dan tiga level V sehingga menghasilkan 72 warna kuantisasi. Setelah itu, dilakukan perhitungan persentase warna dominan dan selanjutnya didapatkan fitur warna dominan yaitu C_{dom} dan C_{fin} .
 - Fitur *Color Moment* merupakan representasi dari fitur warna yang dapat mengkarakterisasikan warna pada citra. Fitur ini digunakan untuk mendapatkan kesamaan warna sebuah gambar. Tahap pertama dilakukan perhitungan dari nilai rata-rata (MeanR, MeanG, MeanB). Tahap kedua dilakukan perhitungan nilai standar deviasi (StdR, StdG, StdB) yang terdapat pada citra. Sedangkan tahap terakhir pengambilan fitur MeanRGB dan StdRGB.
5. Perhitungan nilai rentang DWD dan *Color Moment*: Setelah data hasil ekstraksi fitur didapatkan, selanjutnya mencari nilai rentang DWD dan *Color Moment* dengan menganalisis hasil simulasi matlab. Nilai rentang merupakan nilai rata-rata penjumlahan dari setiap sampel dataset. Nilai rentang digunakan untuk melihat tingkat kematangan setiap kategori atau nilai sebaran piksel. Rentang sebaran DWD dan *Color*



Gambar 2. Alur simulasi penelitian



Gambar 3. Contoh citra (a) kelapa sawit visual; (b) termal; (c) ROI

Moment berdasarkan hasil citra uji ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

- Setelah hasil rentang DWD dan *Color Moment* didapatkan, maka proses selanjutnya adalah melakukan pengklasifikasian menggunakan metode KNN, klasifikasi KNN mengambil nilai dari fitur untuk memprediksi label kategori kelas.

Proses pengambilan fitur klasifikasi KNN dijelaskan sebagai berikut:

- Menggabungkan hasil atribut DWD dan *Color Moment* pada satu bagian, atribut yang digunakan adalah MeanRGB, StdRGB, C_{dom} , dan C_{fin} .
- Membagi hasil atribut ke dalam kelas: Latih, Kelas, Test, dan Kelas.
- Melakukan klasifikasi atau pengelompokan data berdasarkan data pembelajaran dengan jarak paling dekat dengan kategori tersebut.

Gambar 3 menjelaskan kategori tingkat kematangan kelapa sawit berdasarkan Tabel 1, dimana fraksi F00–F0 merupakan tingkat kategori “Tidak matang”, sedangkan fraksi F1–F3 merupakan tingkat kategori “Matang” dan F4–F6 merupakan tingkat kategori “Terlalu matang”.

C. Skenario Pengujian

Penelitian ini diuji menggunakan basis data yang telah diakuisisi seperti dijelaskan pada bagian sebelumnya. Jumlah basis data yang digunakan adalah 120 citra termal buah kelapa sawit dimana citra tersebut dikelompokkan ke dalam 3 kategori yaitu: kategori “tidak matang”, “matang” dan “terlalu matang”. Masing-masing citra dalam setiap kategori akan menjadi citra *query*, sehingga untuk satu kategori dilakukan 40 kali pengujian. Total pengujian berjumlah 120. Tahapan selanjutnya menghitung nilai dari C_{dom} , C_{fin} , MeanRGB, dan StdRGB untuk mengetahui

performansi DWD dan *Color Moment*, sedangkan tahapan akhir yaitu menentukan tingkat kematangan menggunakan klasifikasi KNN berdasarkan nilai input DWD dan *Color Moment*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

- Pengujian menggunakan metode DWD.

Nilai yang dihasilkan dengan menggunakan metode DWD dari masing-masing citra TBS kelapa sawit. Beberapa citra uji kelapa sawit dan hasil dapat dilihat pada Tabel 3.

- Pengujian menggunakan metode *Color Moment*. Hasil pengujian *Color Moment* untuk beberapa *query*, dan hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.

- Pengujian menggunakan klasifikasi (KNN).

Setelah melakukan tahapan alur penelitian dan mendapatkan hasil ekstraksi fitur, langkah selanjutnya melakukan pengklasifikasian menggunakan metode KNN. KNN mengklasifikasikan objek baru berdasarkan atribut dan data training. Pada proses penelitian diambil data sampel berjumlah 120 yang terdiri dari 40 citra tidak matang, 40 citra matang dan 40 citra terlalu matang. Setiap sampel kemudian di masukkan ke dalam kelas yang telah ditentukan dengan rincian sebagai berikut:

- Latih: 75 data sampel yang terdiri dari 25 tidak matang, 25 matang dan 25 terlalu matang. Nilai atribut yang ada: MeanRGB, StdRGB, C_{dom} , C_{fin} dan jenis *query*.
- Kelas: keterangan jenis *query* dari sampel latih. Nilai atribut yang ada: jenis *query*.
- Test: 45 data sampel yang terdiri dari 15 tidak matang, 15 matang, dan 15 terlalu matang. Nilai

atribut yang ada: MeanRGB, StdRGB, C_{dom} , C_{fin} dan jenis *query*.

- Kelas: keterangan jenis *query* dari sampel test. Nilai atribut yang ada: jenis *query*.

Tabel 3 berikut ini merupakan hasil pengujian beberapa sampel citra uji menggunakan metode ekstraksi DWD dan *Color Moment*.

B. Pembahasan Penelitian

1. Pembahasan metode DWD dan *Color Moment*.

Berdasarkan hasil pengujian DWD pada Tabel 3 sebelumnya dapat disimpulkan bahwa DWD memiliki nilai rentang minimum dan maksimum seperti ditunjukkan pada Tabel 5.

Berdasarkan keterangan nilai di atas diketahui bahwa nilai DWD mempunyai ciri-ciri sebagai berikut:

- Tidak matang: Sebaran piksel rendah dan komposisi warna merah sedikit tidak terang.
- Matang: Sebaran piksel sedang dan komposisi warna sedang merah sedang terang.
- Terlalu matang: Sebaran piksel tinggi dan komposisi warna merah banyak terang.

Nilai keterangan ini berkaitan dengan Tabel 1 dan kategori tingkat kematangan berdasarkan warna visual dan termal pada Gambar 3, dimana nilai sebaran piksel berkaitan dengan warna dan suhu. Apabila sebaran piksel rendah maka komposisi warna merah sedikit di bagian inti dan suhu termal berkisar 26-29, sehingga dapat disimpulkan tingkat kematangan TBS tidak matang, sedangkan sebaran piksel sedang maka komposisi warna merah sedang di bagian inti dan suhu termal berkisar 32-37.

Berdasarkan hasil pengujian *Color Moment* pada

Tabel 3. Nilai hasil DWD

Nilai DWD					
Tidak matang		Matang		Terlalu matang	
Jenis	Nilai DWD	Jenis	Nilai DWD	Jenis	Nilai DWD
Citra Uji 1	15,5428	Citra Uji 1	20,9768	Citra Uji 1	23,2412
Citra Uji 2	14,9548	Citra Uji 2	21,268	Citra Uji 2	23,136
Citra Uji 3	13,3044	Citra Uji 3	22,0168	Citra Uji 3	24,5744
Citra Uji 4	11,798	Citra Uji 4	22,3384	Citra Uji 4	24,6508
Citra Uji 5	15,1252	Citra Uji 5	19,8816	Citra Uji 5	23,86
Citra Uji 6	9,3104	Citra Uji 6	18,112	Citra Uji 6	24,064
Citra Uji 7	14,6968	Citra Uji 7	20,8448	Citra Uji 7	23,1444
Citra Uji 8	11,1972	Citra Uji 8	18,928	Citra Uji 8	24,1004
Citra Uji 9	12,0068	Citra Uji 9	19,194	Citra Uji 9	24,306
Citra Uji 10	17,6536	Citra Uji 10	19,3464	Citra Uji 10	24,4316
Min	9,3104	Min	18,112	Min	23,136
Max	17,6536	Max	22,3384	Max	24,6508

Tabel 4 sebelumnya dapat disimpulkan bahwa:

- Semakin tinggi nilai sebaran piksel MeanR dari suatu dataset maka dapat disimpulkan tingkat kematangan TBS semakin matang.
- Nilai Standar deviasi StdR untuk tingkat terlalu matang memiliki nilai sebaran piksel lebih rendah dibandingkan dengan matang dan tidak matang.

2. Pembahasan klasifikasi metode KNN.

Setelah melakukan penggabungan nilai atribut dari MeanRGB, StdRGB, C_{dom} dan C_{fin} , maka didapatkan pengklasifikasian terhadap data sampel. Hasil prediksi nilai klasifikasi bergantung pada kelas latih dan test. Keberhasilan sesuatu klasifikasi dapat ditentukan dengan nilai kelas, jika hasil klasifikasi dan nilai kelas mempunyai kesamaan nilai maka dapat dipastikan nilai keakurasian penelitian tersebut tinggi.

Hasil klasifikasi tingkat kematangan kelapa sawit menggunakan metode KNN sebagai berikut; terdapat tiga kategori saat mengelompokkan tingkat kematangan kelapa sawit yang diuji menggunakan metode KNN yaitu kategori “Tidakmatang”, “Matang” dan “Terlalumatang”. Setiap kategori diuji menggunakan 15 sampel berbeda dari masing-masing kategori. Hasil klasifikasi tingkat kematangan “Tidakmatang” setelah dilakukan pengujian terdapat satu nilai data sampel yang *error*. Sampel yang seharusnya dikategorikan “Tidakmatang”, tetapi dikategorikan “Matang”. Pada hasil klasifikasi kategori “Matang” setelah dilakukan pengujian terdapat dua nilai data sampel yang *error*. Sampel yang seharusnya dikategorikan “Matang”, tetapi dikategorikan sebagai “Terlalumatang”. Sedangkan proses klasifikasi kategori “Terlalumatang” terdapat 2 nilai data sampel yang *error*. Sampel yang seharusnya dikategorikan “Terlalumatang”,

Tabel 4. Nilai hasil *color moment*

Color Moment				
No	Atribut	Tidak Matang	Matang	Terlalu Matang
1	Nilai MeanR	230.6569786	236.8804254	243.1275415
2	Nilai StdR	26.16939955	23.22979941	13.34124081
3	Nilai MeanG	113.7273545	160.0396681	213.4364327
4	Nilai StdG	49.67035443	54.66986766	30.01429652
5	Nilai MeanB	50.93393418	43.99934975	66.19272114
6	Nilai StdB	40.45236216	43.45002915	57.62176516

Tabel 5. Nilai Minimum dan Maksimum DWD

No	Jenis	Fitur DWD
1	Tidak Matang	9-17
2	Matang	18-22
3	Terlalu Matang	23-24

tetapi dikategorikan sebagai kategori “Matang”.

Perhitungan sampel dataset menggunakan *Recognition Rate* :

1. Tidak Matang: 93%
2. Matang: 86%
3. Terlalu Matang: 86%.

Berdasarkan keterangan di atas dapat diambil kesimpulan yaitu:

1. Hasil prediksi dari 45 dataset yang terdiri dari 15 sampel kategori “Tidakmatang”, 15 sampel kategori “Matang” dan 15 sampel kategori “Terlalumatang”, terdapat nilai lima yang *error* dan 40 dataset yang berhasil. Sedangkan nilai akurasi rata-rata menggunakan *Recognition Rate* adalah 89%;
2. Nilai *error* banyak ditemukan pada kategori “Matang” dan “Terlalumatang”;
3. Nilai yang banyak berhasil terdapat pada kategori “Tidakmatang”.

V. KESIMPULAN

Identifikasi tingkat kematangan kelapa sawit menggunakan pencitraan termal lebih efisien karena dikerjakan tanpa campur tangan manusia dan tidak tergantung kepada bantuan pencahayaan dibandingkan dengan metode manual dan metode pemanfaatan citra visual RGB. Penelitian ini menggunakan fitur warna DWD dan *Color Moment*. Fitur warna DWD digunakan untuk mengetahui warna merah yang dominan (yang sering muncul) dalam buah kelapa sawit, dimana semakin tinggi nilai sebaran piksel DWD (dengan warna merah terang) maka dikatakan buah kelapa sawit semakin matang. Sedangkan Fitur *Color Moment* digunakan sebagai pelengkap detail informasi dari warna merah yang dominan dalam buah kelapa sawit, dimana buah kelapa sawit yang matang memiliki nilai dari sebaran MeanR yang tinggi dan nilai StdR memiliki nilai sebaran rendah pada area inti buah kelapa sawit atau TBS. Hasil pengimplementasian pencitraan termal untuk mendeteksi tingkat kematangan buah kelapa sawit menunjukkan kinerja pengenalan yang baik yaitu dengan persentase tingkat pengenalan sebesar 89%.

REFERENSI

- [1] M. Makky, “A Portable Low-cost Non-destructive Ripeness Inspection for Oil Palm FFB,” *Ital. Oral Surg.*, vol. 9, pp. 230–240, 2016.
- [2] R. Rohendar, “Pendugaan Tingkat Kematangan Buah Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* jacq) Berdasarkan Pengolahan Citra Menggunakan Metode Logika Fuzzy,” Fakultas Pertanian, Universitas Syiah Kuala, 2013.
- [3] M. Makky and P. Soni, “In situ quality assessment of intact oil palm fresh fruit bunches using rapid portable non-contact and non-destructive approach,” *J. Food Eng.*, vol. 120, pp. 248–259, 2014.
- [4] N. Fadilah, et al., “Intelligent Color Vision System for Ripeness Classification of Oil Palm Fresh Fruit Bunch,” *Sensors*, doi. 10.3390/s121014179, Malaysia, December 2012.
- [5] Z. May and M. H. Amaran, “Automated Ripeness Assessment of Oil Palm Fruit Using RGB and Fuzzy Logic Technique,” pp. 52–59.
- [6] M. K. Shabdin, et al., “A study on the oil palm fresh fruit bunch (FFB) ripeness detection by using Hue , Saturation and Intensity (HSI) approach A study on the oil palm fresh fruit bunch (FFB) ripeness detection by using Hue , Saturation and Intensity (HSI) approach,” *Earth Environ. sci.* 37012039, 2016.
- [7] M. Shariff, et al., “Comparison of mean temperature taken between commercial and prototype thermal sensor in estimating mean temperature of oil palm fresh fruit bunches,” *IFRJ.*, vol. 23, no. December, pp. 91–95, 2016.
- [8] J. Fraden, “Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications,” Fourth Edi., New York Heidelberg Dordrecht London: April, 2010.
- [9] L. Zhang and A. Li, “Region-of-Interest Extraction Based on Saliency Analysis of Co-Occurrence Histogram in High Spatial Resolution Remote Sensing Images,” in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, no. 5, pp. 2111–2124, May 2015.
- [10] Y. Dhyanti, K. Munadi, and F. Arnia, “Penerapan Deskriptor Warna Dominan untuk Penerapan Deskriptor Warna Dominan untuk Temu Kembali Citra Busana pada Peranti Bergerak,” vol. 12, no. 3, ISSN.1412-4785, Banda Aceh, December 2016.
- [11] M. Oktiana, F. Arnia and K. Munadi, “Retrieval performance of color descriptors derived from DC components of protected JPEG images,” 2016 Asia Pacific Conference on Multimedia and Broadcasting (APMediaCast), Bali, pp. 53–59 , 2016.
- [12] V. Vinayak, “CBIR System using Color Moment and Color Auto-Correlogram with Block CBIR System using Color Moment and Color Auto-Correlogram with Block Truncation Coding,” *International Journal of Computer Application*, vol.161, no.9, pp. 0975-8887, March 2017.
- [13] Z. Zhang, T. Jiang, S. Li, and Y. Yang, “Automated feature learning for nonlinear process monitoring – An approach using stacked denoising autoencoder and k-nearest neighbor rule,” *J. Process Control*, vol. 64, pp. 49–61, 2018.

Perancangan Sistem Panel Surya Terkendali Dalam Dua Sumbu Untuk Peningkatan Efisiensi Pembangkitan Energi Listrik

Porman Pangaribuan, Erwin Susanto, dan Rinaldi Aditya Pratama

Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

Jl. Telekomunikasi No. 1, Terusan Buah Batu, Sukapura, Dayeuhkolot, Bandung, 40257

e-mail: porman@telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Penggunaan panel surya untuk mendapatkan energi listrik dari energi matahari merupakan salah satu upaya memanfaatkan sumber energi terbarukan. Panel surya (*solar cell*) merupakan instrumen yang mampu mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Panel surya tidak hanya digunakan di rumah-rumah atau di tempat-tempat tertentu, namun juga di alat-alat transport besar seperti mobil dan pada kapal laut. Panel surya kebanyakan hanya terpasang dalam posisi diam atau bersifat statis. Sedangkan arah cahaya matahari akan relatif berubah sudutnya terhadap permukaan panel surya. Perubahan itu semakin tak beraturan bila kendaraan tempat panel surya berada bergerak ke arah yang ingin dituju. Kondisi-kondisi seperti ini menyebabkan penyerapan energi matahari oleh panel surya kurang optimal. Pada penelitian ini, telah dirancang sebuah sistem dimana posisi arah hadap panel surya selalu dikendalikan agar arah cahaya matahari selalu jatuh tegak lurus terhadap permukaan panel surya meskipun berada pada lokasi yang berubah-ubah dan arah cahaya matahari terhadap permukaan bumi selalu berubah-ubah. Panel surya yang bisa bermanuver dalam dua sumbu gerak ini dikendalikan oleh sebuah mikrokontroler dan dua buah motor servo sebagai aktuator untuk mengatur posisi panel surya agar permukaannya selalu tegak lurus (mengikuti) arah cahaya matahari. Dari hasil pengujian yang dilakukan pada panel surya pada rancangan penelitian ini dapat menghasilkan daya 6,51% lebih besar dibandingkan dengan energi keluaran panel surya yang bersifat statis, dengan mengabaikan kebutuhan energi pada servo.

Kata kunci: *panel surya, energi terbarukan, mikrokontroler, motor servo*

Abstract—The use of solar panels to get electrical energy from solar energy is one effort to utilize renewable energy resources. Solar panels (*solar cells*) are instruments that can convert the energy of sunlight into electrical energy. Solar panels are not only used in homes or in certain places, but also in large transport equipment such as cars and on ships. Solar panels are mostly installed in a stationary or static position. Whereas the direction of sunlight will change its angle relative to the surface of the solar panel. The change is increasingly irregular if the vehicle where the panel is located moves in the direction you want to go. Conditions like this cause the absorption of solar energy by solar panels to be less than optimal. In this research, a system has been designed where the solar panel was always controlled so that the direction of sunlight always falls perpendicular to the surface of the solar panel even though it was in a changing location and the direction of the sun's light on the earth's surface was always changing. Solar panels that can maneuver in two axes of motion were controlled by a microcontroller and two servo motors as actuators to adjust the position of the solar panel so that the surface was always perpendicular (following) the direction of sunlight. From the results of the tests, it turns out that solar panels in this research design can produce power 6.51% greater compared to static solar panels output.

Keywords: *solar cell, renewable energy, microcontroller, servomotor*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Pemakaian energi listrik dari waktu ke waktu semakin meningkat baik untuk kebutuhan penerangan, peralatan rumah tangga, peralatan perkantoran maupun di industri. Untuk itu tentunya upaya penyediaan pembangkitan energi listrik pun terus meningkat. Di beberapa negara termasuk Indonesia, pembangkitan energi listrik masih banyak memanfaatkan bahan bakar fosil. Sebagaimana

kita ketahui bahan bakar fosil merupakan sumber energi yang bersifat tak terbarukan dan saat ini cadangannya di bumi semakin menipis. Untuk pembentukan kembali diperlukan waktu jutaan tahun, sehingga perlu dicari sumber energi alternatif dan bersifat terbarukan.

Di negara-negara tropis, seperti di Indonesia, cahaya matahari hampir selalu muncul dalam durasi waktu tertentu setiap harinya. Akhir-akhir ini upaya untuk memanfaatkan sumber energi matahari/surya untuk dirubah menjadi energi

listrik sudah sangat berkembang. Dengan menggunakan panel surya (*solar cell*), energi surya dapat diubah menjadi energi listrik. Saat ini sudah banyak tersedia dan dijual panel surya (sejumlah sel surya yang tersusun secara seri dan paralel dalam bentuk yang kompak) yaitu sebuah alat yang mampu mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Permasalahan utama pada pengubahan (konversi) energi ini adalah keluaran yang dihasilkan tidak sebesar pembangkitan energi konvensional dengan bahan bakar fosil. Untuk itu upaya meningkatkan efisiensi konversi energi ini menjadi bidang riset yang sangat menarik. Beberapa upaya untuk meningkatkan efisiensi konversi energi surya, diantaranya adalah dengan metode *maximum power point tracking* dengan berbagai metode kendali seperti logika fuzzy [1], *perturb and observe* (P&O) [2] dan *grey wolf optimization* [3]. Pada penelitian ini, upaya untuk meningkatkan keluaran dari panel surya dilakukan dengan mengatur posisi bidang panel surya untuk selalu mendapatkan radiasi cahaya matahari secara maksimum.

Panel surya sudah mulai banyak dimanfaatkan di rumah-rumah untuk kepentingan penerangan atau pemanas air dan juga di pinggir jalan raya untuk kepentingan penerangan. Panel surya juga mulai ditempatkan di kapal laut dan mobil yang kemudian dimanfaatkan utk pembangkitan energi listrik untuk kepentingan tertentu. Namun kebanyakan panel surya hanya terpasang begitu saja dan bersifat statis. Sedangkan arah cahaya matahari akan selalu berubah sudut setiap waktunya, hal ini menyebabkan penyerapan energi matahari oleh panel surya kurang optimal [4,5], dan perubahan arah itu akan semakin tak beraturan ketika panel surya ditempatkan di kendaraan yang bergerak ke arah tujuan yang mau dicapai.

Untuk mendapatkan penyerapan energi surya yang optimal maka telah diusulkan rancangan inovasi yang baru, yakni sebuah sistem yang meliputi panel surya yang selalu dikendalikan agar arah cahaya matahari selalu jatuh tegak lurus terhadap permukaan panel surya meskipun panel surya berada pada lokasi yang berubah-ubah dan arah cahaya matahari terhadap permukaan bumi selalu berubah-ubah. Panel surya yang dirancang pada penelitian ini dapat bermanuver dalam dua sumbu gerak.

Meskipun penelitian dan perancangan penjejak surya (*solar tracker*) telah dilakukan sebelumnya seperti pada penelitian [4-8], penelitian pada makalah ini memiliki keunggulan: i) memiliki fleksibilitas pergerakan dibandingkan dengan rancangan pada [4,7] karena pergerakan dua sumbu, dan ii) lebih sederhana, berbiaya rendah dan dapat langsung digunakan secara *portable*.

II. STUDI PUSTAKA

Perancangan perangkat keras dan perangkat lunak untuk membangun sistem kendali posisi panel surya dengan struktur dua sumbu berdasarkan pustaka acuan, mengacu pada landasan teoretik berikut:

A. Sel Surya (Solar Cell)

Prinsip utama sebuah sel surya atau *solar cell* adalah prinsip efek fotovoltaiik yaitu kemampuannya mengubah energi foton dari cahaya matahari menjadi energi listrik.

Solar sel terbuat dari bahan semikonduktor, yang setidaknya terdiri dari dua lapisan semikonduktor, yaitu lapisan semikonduktor positif dan lapisan semikonduktor negatif. Ketika sebuah foton (partikel cahaya) menumbuk elektron bebas dari bahan semikonduktor maka elektron bebas tersebut akan keluar/bergerak sehingga terjadilah aliran listrik. Sel-sel surya (sel-sel fotovoltaiik) kemudian disusun dalam hubungan seri maupun paralel dalam bentuk yang kompak yang dikenal sebagai panel surya. Daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya akan tergantung pada tingkat efisiensi jenis sel surya dan juga luas permukaan panel serta intensitas cahaya yang diserap panel, yang dinyatakan oleh rumus berikut :

$$P = I_r \cdot A \cdot \eta, \quad (1)$$

dimana:

P = Daya listrik yang dihasilkan

I = Intensitas radiasi yang diserap panel

A = Luas penampang efektif panel surya

η = Efisiensi sel surya.

B. Struktur Pemasangan Panel Surya

Dalam pembangkitan energi listrik, panel surya haruslah terpasang dalam suatu struktur atau kerangka yang rapi dan terlindungi dan dibuat sedemikian supaya mudah dirawat. Pada umumnya terdapat dua jenis struktur pemasangan panel surya yaitu:

1. Sistem penyangga tetap (*fixed*)

Pada sistem ini panel surya diletakkan pada struktur yang tetap (*fixed*) dan terarah ke matahari dengan sudut sikap tertentu. Sudut kemiringan biasanya disesuaikan berdasarkan letak panel surya tersebut dipasang. Keuntungan dari sistem penyangga tetap ini adalah sistem lebih sederhana dan biaya perawatan lebih murah karena perawatannya tidak terlalu rumit dibandingkan dengan *tracking system* yang dijelaskan berikutnya.

2. Sistem pelacak cahaya (*tracking system*)

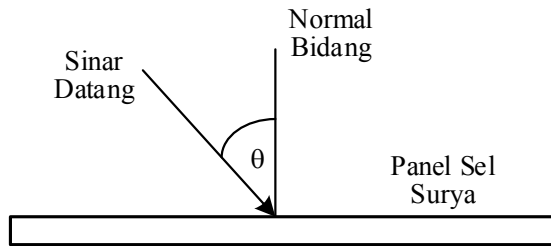
Sistem pelacak cahaya adalah suatu sistem yang digunakan untuk mengarahkan panel surya agar cahaya matahari jatuh secara tegak lurus terhadap permukaan panel surya dengan tujuan panel surya tersebut dapat menyerap cahaya matahari secara optimal [5].

Kedua struktur pemasangan panel surya yang dijelaskan ini akan berpengaruh pada sudut datang cahaya sehingga akan mempengaruhi radiasi yang diterima. Besarnya radiasi yang diterima panel surya dapat dijelaskan dengan gambar dan rumus berikut:

$$I_r = I_{r0} \cos \theta, \quad (2)$$

dimana :

I_r = Intensitas radiasi yang diserap pane



Gambar 1. Arah sinar datang terhadap normal bidang

I_0 = Intensitas radiasi yang mengenai panel
 θ = Sudut datang cahaya terhadap bidang normal .

Radiasi yang diserap akan maksimum ketika $\theta=0$ atau cahaya matahari jatuh tegak lurus terhadap permukaan panel surya.

III. METODE

Metode yang dilaksanakan dalam penelitian ini meliputi strategi pergerakan panel surya yang dapat melacak cahaya, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak serta melakukan pengujian untuk membuktikan efektifitas sistem yang dibangun dibandingkan dengan sistem panel surya dengan posisi tetap atau statis. Gambar 2 merepresentasikan diagram blok sistem kendali posisi tracking panel surya.

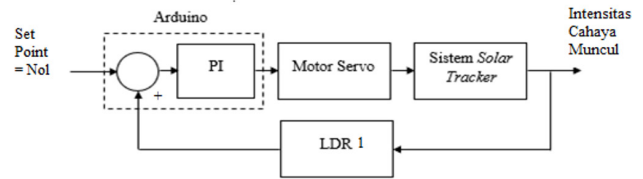
A. Desain Perangkat Keras

Perangkat keras yang dirancang membutuhkan berbagai komponen. Sebagai sensor cahaya digunakan jenis *photoconductive*, yaitu sensor LDR (*Light Dependent Resistor*) sebanyak dua pasang. Kemudian digunakan mikrokontroler Arduino yang berfungsi sebagai otak pengolah data sinyal dari sistem yang akan mengatur seluruh kerja sistem. Sebagai aktuator digunakan dua buah motor servo. Hasil besaran analog yang terdeteksi oleh LDR selanjutnya dikirim ke Arduino melalui pin ADC (*Analog to Digital Converter*) untuk diolah dan menghasilkan perintah-perintah pada aktuator. Gambar 3 menunjukkan model struktur perangkat keras dari sistem yang dibuat.

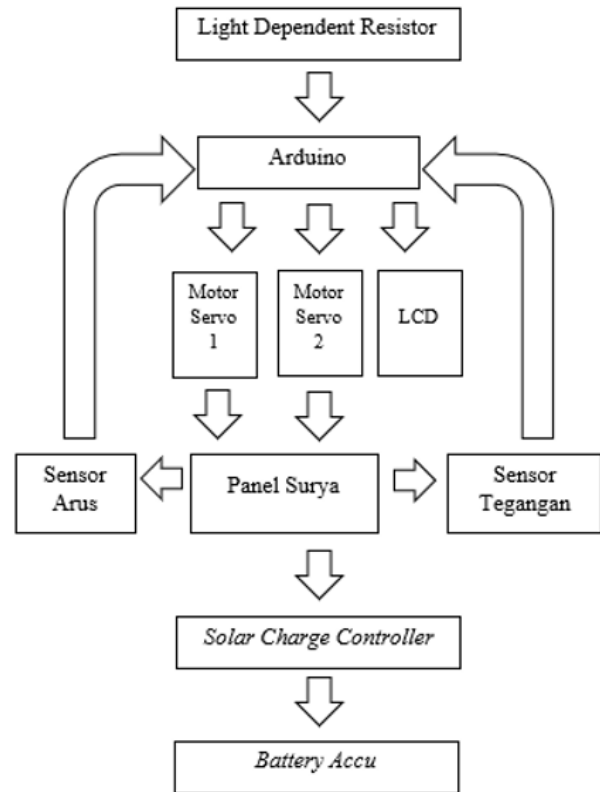
Mikrokontroler tipe Arduino telah diprogram sebagai pengendali Proportional + Integral (PI). Arduino akan menerima masukan dari sensor cahaya, LDR (*light dependent resistor*). Dua buah motor servo yang berfungsi sebagai aktuator dari sistem akan mengubah sikap panel surya sesuai dengan perintah pengaturan dari Arduino agar posisi panel surya selalu tegak lurus dengan arah datangnya cahaya.

Servo yang digunakan MG995 High Speed Metal Gear Dual Ball Bearing Servo dengan torsi maksimum 10kgf. cm untuk tegangan 6 V, putaran maksimum 60° dicapai dalam waktu 0,16 detik.

Sensor yang digunakan dalam perancangan sistem ini merupakan sensor cahaya jenis *photoconductive*, yaitu sensor LDR (*light Dependent Resistor*). LDR berfungsi



Gambar 2. Blok diagram sistem kendali posisi tracking panel surya



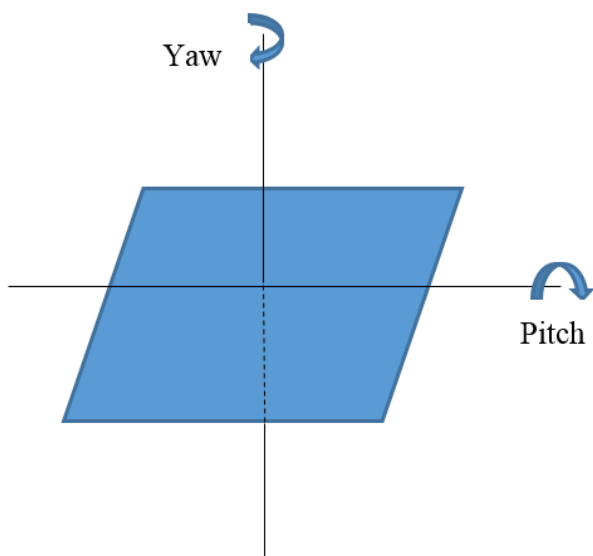
Gambar 3. Model struktur perangkat keras panel surya

untuk mendeteksi cahaya, hasil besaran analog yang terdeteksi oleh LDR selanjutnya dikirim ke Arduino melalui pin ADC (*Analog to Digital Converter*) Arduino untuk diolah. Setelah data diolah oleh Arduino, Arduino akan mengatur dua buah motor servo supaya bergerak ke arah kiri atau kanan, dengan bergeraknya motor servo tersebut, panel surya akan ikut bergerak sehingga posisi panel surya selalu tegak lurus dengan arah cahaya. Motor servo pertama yang letaknya dibawah berfungsi untuk menggerakkan alat berputar ke kiri atau ke kanan (gerakan sumbu *yaw* atau sumbu geleng). Sedangkan motor servo kedua yang letaknya di samping panel surya berfungsi untuk menggerakkan panel surya naik atau turun (gerakan sumbu *pitch* atau sumbu angguk). Gambar sistem sumbunya sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.

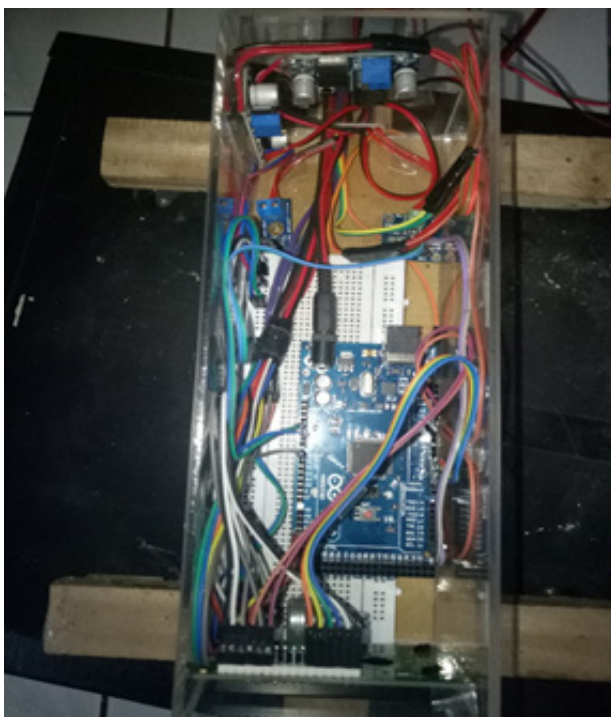
Untuk mengetahui tegangan dan arus yang dihasilkan oleh panel surya digunakan dua buah sensor yaitu sensor tegangan dan sensor arus, nilai yang dihasilkan oleh kedua sensor tersebut akan ditampilkan melalui LCD. Daya yang dihasilkan oleh panel surya selanjutnya dialirkan menuju SSC (*Solar Charge Controller*), solar charge controller disini berfungsi untuk menjaga dan melindungi baterai agar tidak cepat rusak. Jika panel surya langsung

disambungkan dengan baterai, maka panel surya akan melakukan pengisian secara berlebihan terhadap baterai atau tegangan yang diterima oleh baterai melebihi tegangan daya yang dapat ditampung oleh baterai tersebut. Setelah dikontrol oleh solar charge controller, daya selanjutnya dialirkan menuju baterai accu untuk disimpan, sehingga dapat digunakan kapanpun jika sewaktu-waktu diperlukan.

Selanjutnya, desain sistem kendali penjejakkan terhadap arah datang cahaya matahari ditunjukkan pada Gambar 5. Sistem kendali posisi arah datangnya cahaya matahari pada panel surya yang dibuat pada penelitian ini dirancang mengikuti diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 4. Sistem sumbu pergerakan panel surya



Gambar 5. Rancangan sistem kendali tracking cahaya pada panel surya

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

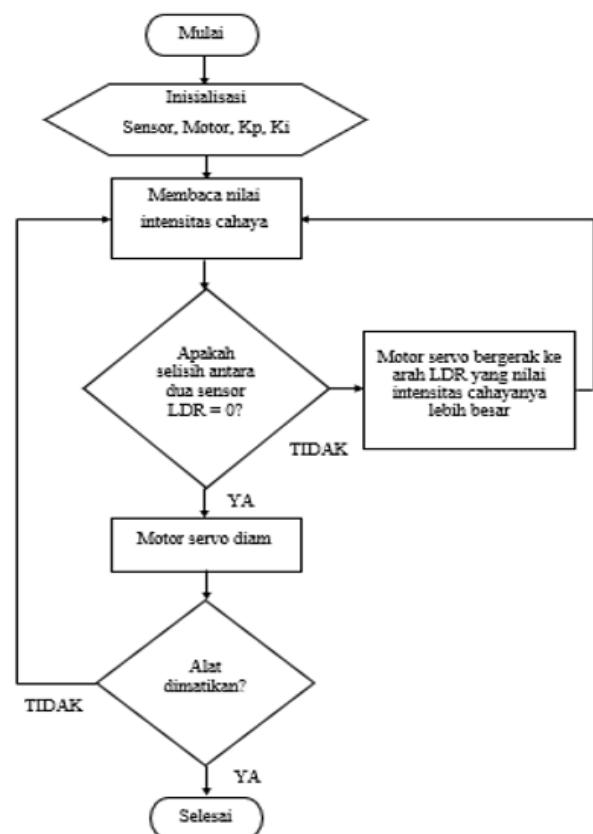
Untuk mengetahui optimasi yang bisa dihasilkan oleh panel surya yang terkendali dalam dua sumbu ini dilakukan pengujian selama tiga hari seperti Gambar 7.

A. Pengujian Hari Pertama

Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya yang terkendali dalam dua sumbu dengan daya listrik yang dihasilkan panel surya yang bersifat statis. Pengujian dilakukan di tempat terbuka yang terkena sinar cahaya matahari. Kedua panel surya diletakkan bersebelahan. Pengujian dilakukan pada hari, tempat, dan waktu yang sama.

Pada Tabel 1 tampak bahwa nilai rata-rata daya yang dihasilkan pada panel surya terkendali adalah sebesar 13,44575 Watt. Sedangkan untuk pengujian terhadap panel surya yang bersifat statis dapat dilihat pada Tabel 2 dimana, nilai rata-rata daya yang dihasilkan adalah sebesar 12,58476 Watt. Jadi daya listrik rata-rata yang dihasilkan panel surya yang dipasang sistem kendali lebih besar dibandingkan dengan panel surya yang bersifat statis, Selisih daya rata-rata yang dihasilkan antara dua panel tersebut adalah sebesar 0,860991 Watt. Jadi sistem panel yang dikendalikan menghasilkan daya sekitar 6,84% lebih tinggi dibandingkan dengan sistem statis.

Hasil pengujian tersebut dalam bentuk grafik, ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 6. Diagram alir sistem kendali tracking panel surya

Gambar 8 menampilkan bahwa daya listrik yang dihasilkan dari waktu ke waktu dari pukul 10.00 sampai dengan pukul 14.00 selalu dihasilkan lebih tinggi oleh panel surya yang terkendali. Hal ini terjadi karena intensitas radiasi yang terserap oleh panel surya yang terkendali selalu lebih tinggi.

B. Pengujian Hari Kedua

Pengujian pada hari kedua dilakukan ditempat yang sama, yaitu di balkon rumah yang terkena cahaya matahari. Waktu pengujian juga sama untuk kedua sistem yaitu dilaksanakan pada pukul 10.00 WIB sampai dengan 14.00 WIB.

Pada Tabel 3 dapat dilihat nilai rata-rata daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya yang terkendali adalah



Gambar 7. Pengujian panel surya statis dan terkendali

Tabel 1. Pengujian panel surya terkendali hari pertama

No	Waktu	Tegangan (V)	Arus (mA)	Daya (W)
1	10.00	13,28	1004	13,33312
2	10.15	13,24	997	13,20028
3	10.30	13,26	1006	13,33956
4	10.45	13,15	958	12,3977
5	11.00	13,21	980	12,9458
6	11.15	13,04	951	12,40104
7	11.30	13,07	982	12,83474
8	11.45	13,08	998	13,05384
9	12.00	13,11	1021	13,38531
10	12.15	13,1	1048	13,7288
11	12.30	13,12	1076	14,11712
12	12.45	13,14	1094	14,37516
13	13.00	13,13	1057	13,87841
14	13.15	13,1	1065	13,9515
15	13.30	13,11	1064	13,94904
16	13.45	13,12	1048	13,74976
17	14.00	13,12	1047	13,73664
Rata-rata		13,14	1023,294	13,44575

sebesar 13,91068 Watt. Sedangkan dari Tabel 4, tampak daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya yang bersifat statis rata-rata sebesar 13,16563 Watt. Selisih daya rata-rata yang dihasilkan oleh panel surya yang terkendali dengan daya rata-rata yang dihasilkan oleh panel surya yang bersifat statis adalah sebesar 0,74505 Watt.

Hasil pengujian tersebut dalam bentuk grafik, ditampilkan pada Gambar 8.

Tabel 2. Pengujian panel surya statis hari pertama

No	Waktu	Tegangan (V)	Arus (mA)	Daya (W)
1	10.00	13,17	940	12,3798
2	10.15	13,15	928	12,2032
3	10.30	13,15	936	12,3084
4	10.45	12,95	887	11,48665
5	11.00	13,17	914	12,03738
6	11.15	12,98	894	11,60412
7	11.30	13,02	905	11,7831
8	11.45	13,06	915	11,9499
9	12.00	13,06	966	12,61596
10	12.15	13,05	996	12,9978
11	12.30	13,1	1006	13,1786
12	12.45	13,13	1038	13,62894
13	13.00	13,09	1014	13,27326
14	13.15	13,08	1016	13,28928
15	13.30	13,09	1002	13,11618
16	13.45	13,1	998	13,0738
17	14.00	13,08	995	13,0146
Rata-rata		13,08412	961,7647	12,58476

Tabel 3. Pengujian panel surya terkendali hari kedua

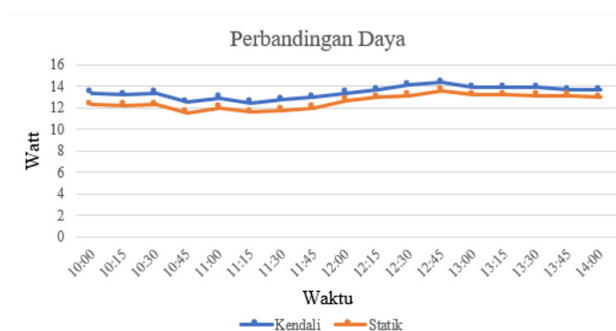
No	Waktu	Tegangan (V)	Arus (mA)	Daya (W)
1	10.00	13,12	1075	14,104
2	10.15	13,1	1037	13,5847
3	10.30	13,1	1044	13,6764
4	10.45	13,07	1033	13,50131
5	11.00	13,11	1035	13,56885
6	11.15	13,16	1082	14,23912
7	11.30	13,14	1050	13,797
8	11.45	13,16	1055	13,8838
9	12.00	13,09	1030	13,4827
10	12.15	13,14	1080	14,1912
11	12.30	13,11	1117	14,64387
12	12.45	13,14	1093	14,36202
13	13.00	13,09	1082	14,16338
14	13.15	13,15	1067	14,03105
15	13.30	13,1	1050	13,755
16	13.45	13,11	1040	13,6344
17	14.00	13,14	1055	13,8627
Rata-rata		13,11941	1060,294	13,91068

Gambar 9 menampilkan bahwa daya listrik yang dihasilkan dari waktu ke waktu dari pukul 10.00 sampai dengan pukul 14.00 selalu dihasilkan lebih tinggi oleh panel surya yang terkendali. Hal ini terjadi karena intensitas radiasi yang terserap oleh panel surya yang terkendali selalu lebih tinggi karena sikap/posisi panel surya selalu mengarah kepada arah datangnya cahaya matahari.

C. Pengujian Hari Ketiga

Pengujian selanjutnya dilakukan pada hari ketiga, pengujian dilakukan ditempat dan waktu yang sama yaitu di balkon rumah yang terkena cahaya matahari selama waktu pengujian dan dilaksanakan pada pukul 10.00 WIB sampai dengan 14.00 WIB. Nilai rata-rata yang dihasilkan oleh panel surya yang terkendali oleh dua sumbu dapat dilihat pada Tabel 5.

Nilai rata-rata daya yang dihasilkan oleh panel surya yang terkendali oleh dua sumbu adalah sebesar 13,87178



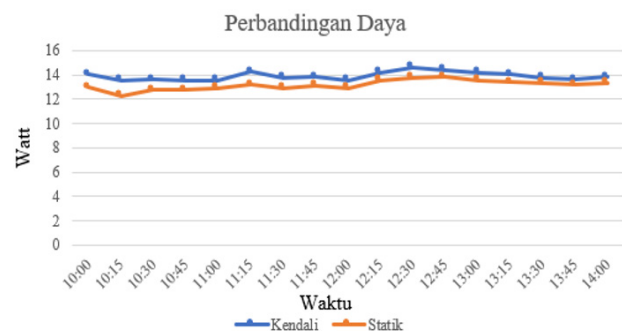
Gambar 8. Perbandingan daya keluaran panel surya statis dan terkendali, hari pertama

Tabel 4. Pengujian panel surya statis hari kedua

No	Waktu	Tegangan (V)	Arus (mA)	Daya (W)
1	10.00	13,1	991	12,9821
2	10.15	13,04	937	12,21848
3	10.30	13,05	981	12,80205
4	10.45	13,06	979	12,78574
5	11.00	13,08	987	12,90996
6	11.15	13,11	1005	13,17555
7	11.30	13,11	987	12,93957
8	11.45	13,09	1003	13,12927
9	12.00	13,09	982	12,85438
10	12.15	13,14	1034	13,58676
11	12.30	13,09	1051	13,75759
12	12.45	13,1	1054	13,8074
13	13.00	13,09	1037	13,57433
14	13.15	13,11	1025	13,43775
15	13.30	13,06	1019	13,30814
16	13.45	13,08	1011	13,22388
17	14.00	13,1	1017	13,32276
Rata-rata		13,08824	1005,882	13,16563

Watt. Sedangkan untuk panel surya yang bersifat statis dapat dilihat pada Tabel 6. Nilai rata-rata daya yang dihasilkan oleh panel tersebut adalah sebesar 12,93835 Watt.

Pada Gambar 10 terlihat grafik daya yang dihasilkan pada pengujian hari ketiga. Nilai daya yang dihasilkan oleh panel surya yang terkendali oleh dua sumbu selalu lebih besar dibandingkan dengan panel surya yang bersifat statis. Hal tersebut terjadi karena panel surya yang dipasang sistem kendali selalu bergerak ke arah sensor LDR dengan intensitas cahaya matahari terbesar, sehingga posisi panel surya mengarah ke arah datangnya sinar cahaya matahari, oleh karena itu arus yang dihasilkannya pun lebih besar dibandingkan dengan panel surya yang bersifat statis. Pada pengujian hari ketiga, selisih daya yang dihasilkan oleh panel surya yang terkendali oleh dua sumbu dengan panel surya yang bersifat statis adalah sebesar 0,676227 Watt.



Gambar 9. Perbandingan daya keluaran panel surya statis dan terkendali, hari kedua

Tabel 5. Pengujian panel surya terkendali hari ketiga

No	Waktu	Tegangan (V)	Arus (mA)	Daya (W)
1	10.00	13,24	1064	14,08736
2	10.15	13,22	1058	13,98676
3	10.30	13,22	1082	14,30404
4	10.45	13,26	1176	15,59376
5	11.00	13,2	1062	14,0184
6	11.15	13,18	1048	13,81264
7	11.30	13,18	1042	13,73356
8	11.45	13,16	1044	13,73904
9	12.00	13,16	1037	13,64692
10	12.15	13,14	1003	13,17942
11	12.30	13,09	1022	13,37798
12	12.45	13,08	1020	13,3416
13	13.00	13,1	1032	13,5192
14	13.15	13,12	1055	13,8416
15	13.30	13,14	1064	13,98096
16	13.45	13,18	1052	13,86536
17	14.00	13,16	1048	13,79168
Rata-rata		13,16647	1053,471	13,87178

Tabel 6. Pengujian panel surya statis hari ketiga

No	Waktu	Tegangan (V)	Arus (mA)	Daya (W)
1	10.00	13,12	1029	13,50048
2	10.15	13,12	1008	13,22496
3	10.30	13,13	1024	13,44512
4	10.45	13,14	1082	14,21748
5	11.00	13,12	1004	13,17248
6	11.15	13,1	972	12,7332
7	11.30	13,1	968	12,6808
8	11.45	13,08	951	12,43908
9	12.00	13,07	949	12,40343
10	12.15	13,1	919	12,0389
11	12.30	13,08	937	12,25596
12	12.45	13,08	935	12,2298
13	13.00	13,06	987	12,89022
14	13.15	13,07	1002	13,09614
15	13.30	13,08	1022	13,36776
16	13.45	13,11	1004	13,16244
17	14.00	13,12	998	13,09376
Rata-rata		13,09882	987,7059	12,93835

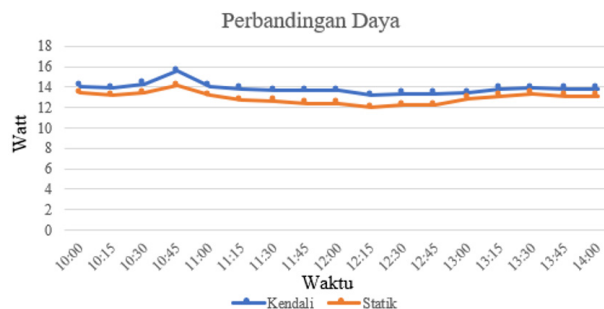
V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil implementasi sistem dan pengolahan analisis data yang telah dilakukan maka didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem telah berhasil dibuat dengan memanfaatkan empat buah LDR sebagai sensor cahaya dan dua buah motor servo sebagai aktuator untuk mengubah-ubah sikap panel surya agar selalu mengarah ke arah datangnya cahaya matahari.
2. Berdasarkan pengujian yang dilakukan selama 3 hari, panel surya yang terkendali oleh dua sumbu menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan dengan panel surya yang hanya diam ditempat. Rata-rata daya yang dihasilkan oleh panel surya yang terkendali dalam dua sumbu adalah sebesar 13,74 Watt, sedangkan untuk panel surya yang hanya diam ditempat hanya menghasilkan daya sebesar 12,90 Watt.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya



Gambar 10. Perbandingan daya keluaran panel surya statis dan terkendali, hari ketiga

kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Telkom atas dukungannya dalam penelitian ini melalui skema Hibah Penelitian Dasar dan Terapan 2018.

REFERENSI

- [1] A.J. Lubis, E. Susanto and U. Sunarya, "Implementation of Maximum Power Point Tracking on Photovoltaic Using Fuzzy Logic Algorithm", *Telkomnika*, Vol 13, No 1, Mar 2015, pp. 32-40.
- [2] H. A. Sher, A.F. Murtaza, A. Noman, K. E. Addoweesh, K.Al-Haddad and M. Chiaberge, "A New Sensorless Hybrid MPPT Algorithm Based on Fractional Short-Circuit Current Measurement and P&O MPPT", *IEEE Transaction on Sustainable Energy*, Vol. 6, No. 4, Oct 2015, pp. 1426-1434
- [3] R. Faulianur, I.D. Sara, dan F. Arnia, "Simulasi Pelacakan Titik Daya Maksimum Modul Surya dengan Metode Grey Wolf Optimization", *Jurnal Rekayasa Elektrika*, Vol. 14, No. 1, April 2018, hal. 26-34.
- [4] A. I. Haq, Sumardi, dan M. A. Riyadi, "Sistem Tracking Panel Surya untuk Pengoptimalan Daya Menggunakan Metode Kendali Logika Fuzzy" *Sinergi*, Vol 18 No 3, Oktober 2014, hal. 117-122
- [5] L. M. Giripunje, G. Gholave, K. Ghorpade, and T. Akhade, "Solar Tracking for Maximum Utilization of Solar Energy", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol 4, No 2, Feb 2017, pp.1911-1916.
- [6] M. K. Lokhande, "Automatic Solar Tracking System", *International Journal of Core Engineering & Management (IJCEM)*, Vol 1, Issue 7, Oct 2014, pp. 122-133.
- [7] R. Syafrialdi. dan Wildian., "Rancang Bangun Solar Tracker Berbasis Mikrontroler ATmega8535 dengan Sensor LDR dan penampil LCD", *Jurnal Fisika Unand*, Volume 4, No. 2, April 2015, hal. 113-122.
- [8] Kamil Plachta, "Autonomous Tracking Controller for Photovoltaic Systems Using Global Positioning System", *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 12-15 June 2018.

Penerbit:

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: rekayasa.elektrika@unsyiah.net

Telp/Fax: (0651) 7554336

